

Trabajo Fin de Grado Ingeniería Civil

Caracterización experimental del comportamiento del adobe frente a cargas de compresión simple

Autor: Javier Gómez Bermudo

Tutor: Mario Solís Muñiz

**Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería Civil

Caracterización experimental del comportamiento del adobe frente a cargas de compresión simple

Autor:

Javier Gómez Bermudo

Tutor:

Mario Solís Muñiz

Profesor Titular

Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Caracterización experimental del
 comportamiento del adobe frente a cargas de compresión simple

Autor: Javier Gómez Bermudo
Tutor: Mario Solís Muñiz

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Resumen

La tierra cruda constituye el material de construcción más utilizado en numerosas regiones de nuestro planeta.

Principalmente, su uso es destacado en los países menos desarrollados, dado que el coste asociado a su producción es insignificante. Siendo uno de los elementos primitivos con los que comenzó a construir el ser humano, en los tiempos modernos, y en los países más pudientes, se ha ido viendo desbancado por la imperiosa llegada de otros materiales más resistentes, como el hormigón o el acero.

Desde entonces, la tierra cruda pasa a un segundo plano, pues ya deja de ser económicamente rentable invertir tiempo y dinero en estudiar las mejoras de sus propiedades mecánicas.

La escasez de investigaciones relativas al estudio de las propiedades de este material provoca una especial vulnerabilidad en las construcciones realizadas a partir del mismo, no obstante, tales investigaciones van avanzando paulatinamente a través de trabajos de cooperación y gracias al impulso de algunas universidades.

Estos trabajos tienen una elevada importancia a nivel socioeconómico, pues, además de presentar alternativas para mejorar las propiedades de este tipo de viviendas en países en vías de desarrollo, son un estímulo para que prospere la inclusión de este tipo de construcciones en la sociedad moderna, y, dado que éste material presenta encomiables ventajas medioambientales, su uso supondría un importante decrecimiento en las emisiones de CO₂ al planeta.

El propósito de éste proyecto es contribuir al conocimiento del comportamiento mecánico del material adobe, ya que es un material que actualmente se encuentra muy limitado, y no precisamente por sus propiedades, que son abundantes, sino por la ausencia de estudio que permitiría potenciar aquéllas.

Por ello, a lo largo del mismo, se han realizado diversos ensayos en aras de aportar información a la comunidad científica acerca de las propiedades del material. Para ello, se han elaborado una serie de bloques de adobe con los que se han confeccionado probetas y muros a escala (pilas y muretes), y se ha analizado experimentalmente su comportamiento ante una carga de compresión simple o uniaxial.

A partir de estos ensayos, ha sido posible determinar propiedades características del material tales como: resistencia a compresión simple, deformación de pico (deformación correspondiente a la tensión máxima), módulo de elasticidad y ley de comportamiento.

Abstract

Rammed earth is the most used construction material in many regions of our planet.

Mainly, its use is prominent in less developed countries, since the cost associated to its production is insignificant.

Being one of the primitive elements with which the human being began building, in modern times, and in wealthier countries, it has been substituted by the imperious arrival of more resistant materials such as concrete or steel.

Since then, rammed earth moves into the background, as it is no longer economically profitable to invest time and money in studying the improvement of its mechanical properties.

The scarce research on the properties of this material causes a particular vulnerability in constructions made of itself. Research on their intrinsic properties are gradually advancing through cooperation works and the impulse of universities.

These works have a high importance at socioeconomic level, because apart from presenting alternatives to improve the properties of such constructions in developing countries, promoting their inclusion in modern society encourages a decrease in CO₂ emissions to the planet.

The purpose of this project is to contribute to the knowledge of the mechanical behaviour of adobe material.

Therefore, we have elaborated a series of adobe blocks which have been used to construct samples and full scale walls, and their response to single or uniaxial load compression has been experimentally analyzed.

From these tests it has been possible to determine characteristic properties of the material such as simple compressive strength, peak strain (strain corresponding to the maximum deformation), elasticity modulus and stress-strain curves.

Índice Abreviado

<i>Resumen</i>	I
<i>Abstract</i>	II
<i>Índice Abreviado</i>	III
1 Introducción	1
1.1 Objetivos del presente trabajo	1
1.2 La tierra como material de construcción	2
1.3 Historia, patrimonio e importancia social	5
1.4 Arquitectura sostenible	8
1.5 Antecedentes de investigación acerca del adobe en Sevilla	9
1.6 Descripción de los ensayos	10
2 Composición y elaboración de mampostería de adobe	12
2.1 Selección de tierras	12
2.2 Elaboración de los bloques de adobe	14
2.3 Confección de la mampostería de adobe	19
3 Preparación de los ensayos	22
3.1 Calibración de sensores	22
3.2 Fabricación y preparación del utillaje	25
3.3 Confección de las probetas	29
3.4 Normativas de referencia	33
4 Ejecución de los ensayos	36
4.1 Descripción de la maquinaria empleada	38
4.2 Resultados de los ensayos	40
5 Análisis de los resultados	67
5.1 Análisis de ensayos por tipología	68
5.2 Comparación de propiedades asociadas a la tipología de ensayo	72
6 Conclusiones y trabajos futuros	75
<i>Índice de Figuras</i>	77
<i>Índice de Tablas</i>	81
<i>Bibliografía</i>	83

Índice

<i>Resumen</i>	I
<i>Abstract</i>	II
<i>Índice Abreviado</i>	III
1 Introducción	1
1.1 Objetivos del presente trabajo	1
1.2 La tierra como material de construcción	2
1.2.1 Diferentes técnicas de construcción con tierra cruda	3
Tapial	3
Quincha	3
Adobe	3
BTC	4
1.3 Historia, patrimonio e importancia social	5
1.3.1 Historia	5
1.3.2 Patrimonio	6
1.3.3 Importancia Social	6
1.4 Arquitectura sostenible	8
1.5 Antecedentes de investigación acerca del adobe en Sevilla	9
1.6 Descripción de los ensayos	10
2 Composición y elaboración de mampostería de adobe	12
2.1 Selección de tierras	12
2.1.1 Pruebas de campo	12
Pruebas que permiten conocer la calidad del material	12
Pruebas organolépticas	13
2.1.2 Pruebas de laboratorio	13
2.2 Elaboración de los bloques de adobe	14
2.3 Confección de la mampostería de adobe	19
3 Preparación de los ensayos	22
3.1 Calibración de sensores	22
3.2 Fabricación y preparación del utillaje	25
3.3 Confección de las probetas	29
3.4 Normativas de referencia	33
3.4.1 Normativa concerniente a ensayos de probetas	33
NTE E.080, Perú	33
UNE-EN 772-1	33

3.4.2	Normativa concerniente a ensayos de pilas	33
	UNE-EN 1052-1	34
	NTE E.080, Perú	35
3.4.3	Normativa concerniente a ensayos de muretes	35
	NNMX-C-464-ONNCCE-2010, Nuevo México	35
	ASTM E519, Norma Internacional	35
4	Ejecucion de los ensayos	36
4.1	Descripción de la maquinaria empleada	38
4.1.1	Máquina universal de ensayos marca servosis	38
4.1.2	Pórtico de carga marca servosis	39
4.2	Resultados de los ensayos	40
4.2.1	Ensayos de probetas cúbicas	40
4.2.2	Ensayos de probetas prismáticas	47
4.2.3	Probetas prismáticas instrumentadas con LVDT	53
4.2.4	Ensayos de probetas cilíndricas	56
4.2.5	Ensayos de pilas	60
5	Análisis de los resultados	67
5.1	Análisis de ensayos por tipología	68
5.1.1	Análisis de los ensayos de cubos	68
5.1.2	Análisis de los ensayos de prismas	69
5.1.3	Análisis de los ensayos de prismas instrumentados con LVDT y cilindros	70
5.1.4	Análisis de los ensayos de pilas	71
5.2	Comparación de propiedades asociadas a la tipología de ensayo	72
6	Conclusiones y trabajos futuros	75
	<i>Índice de Figuras</i>	77
	<i>Índice de Tablas</i>	81
	<i>Bibliografía</i>	83

1 Introducción

1.1 Objetivos del presente trabajo

El adobe es un material de construcción económico y ecológico utilizado para la construcción de viviendas en cantidad de países, en especial en los menos desarrollados económicamente hablando. Pese a la cantidad de beneficios que presenta este material, es bien conocido que un sismo puede llevar al colapso a este tipo de viviendas debido al mal comportamiento del adobe sometido a tensiones tangenciales. En consecuencia, se han iniciado varios estudios que tratan de caracterizar su comportamiento mecánico, así como de observar como varía su resistencia mediante la aportación de alguna mejora.

El objetivo del presente trabajo de fin de grado se basa en la caracterización mecánica del material de construcción adobe sometido a esfuerzos de compresión. Es un trabajo que trata de complementar la tesis doctoral de D. José Daniel Rodríguez, la cual abarcará no sólo parte de la campaña experimental que hemos llevado a cabo en conjunto, sino también la modelización numérica del comportamiento estructural de la mampostería de adobe. La campaña experimental se ha basado en la confección de los bloques de adobe, así como en la ejecución de las probetas, las pilas y los muretes, siendo el comportamiento mecánico de estos últimos un objetivo a abarcar en trabajos futuros.

A través de los ensayos realizados se pretende obtener:

- Resistencia a compresión de la pila
- Módulo de elasticidad secante a compresión
- Deformación última
- Ley de comportamiento tensión-deformación

Estos resultados se obtendrán a partir de un ajuste en el cual sean considerados todos los ensayos de un mismo tipo.

La peculiaridad de este proyecto es que el material base que se ha utilizado se ha extraído en Sevilla, por lo que nos permite comparar la calidad de la tierra sevillana a través del contraste de los resultados obtenidos con campañas experimentales realizadas anteriormente por otros autores.

1.2 La tierra como material de construcción

Desde los inicios de la humanidad los primeros hombres construían con tierra, formando paredes protectoras para tapar las entradas de sus cavernas. Con el paso del tiempo se conocieron sus características y se aprendió a mejorarlas agregándole fibras vegetales. Hoy en día, gran parte de la población sigue construyendo con ella. Cuando hablamos de tierra como material de construcción nos estamos refiriendo a tierra cruda, en contraposición de lo que predomina en la actualidad, el uso de la tierra cocida en forma de ladrillos. En países con pocos recursos y con gran necesidad de viviendas, sigue siendo la mejor opción por las facilidades que ofrece este material para disponer de él y su bajo coste. Es el material de construcción más importante en muchas regiones del planeta. Además, en numerosas ocasiones no exige la intervención de un personal cualificado para su puesta en obra dada su fácil manipulación, lo que permite que muchas de estas viviendas sean fruto de la autoconstrucción. La maleabilidad es incluso un atractivo, pues permite proporcionar infinidad de formas a la obra.



Figura 1.1 Construcción de tapial y adobe.

La característica más notable de estas construcciones es su elevada capacidad de aislamiento, tanto acústico como térmico, aunque también es característica la poca o nula contaminación asociada a estas.

Por otro lado, la tierra cruda tiene una serie de desventajas que hacen que no sea ergonómico en muchos lugares utilizarla en construcción. Sus malas propiedades mecánicas la desbancan del mercado con respecto al hormigón. Es un material frágil, con poca resistencia a tracción. Además, su heterogeneidad hace muy complicado un cálculo exhaustivo de su capacidad resistente. El agua tampoco es su aliada, pues cuando el material se encuentra húmedo, se reducen aún más sus propiedades mecánicas, pudiendo llegar al colapso sometido únicamente a su peso propio.

Esta desventaja se acentúa cuando la estructura se ve afectada por un sismo. Son numerosos los casos en los que un terremoto ha causado una catástrofe de elevadas dimensiones debido al derrumbe de viviendas de tierra. Las zonas más pobres del planeta coinciden con las áreas geográficas donde más abundan las construcciones de adobe. Estas regiones son precisamente, las más propicias a la actividad sísmica.

1.2.1 Diferentes técnicas de construcción con tierra cruda

Los diferentes tipos de construcción con tierra cruda que nos podemos encontrar son los siguientes:

Tapial

Es una técnica que consiste en alzar un muro macizo constituido por arcilla y arena apilada y prensada. Si comparamos este proceso con las técnicas donde el barro se utiliza en un estado más húmedo, produce una retracción más baja y una mayor resistencia. Prensarlo y darle una compactación óptima requiere de un encofrado. Una vez colocado, se vierte el barro en su interior y se prensa. Cuando el muro está seco, el encofrado se retira y se deja secar al aire libre. Se puede mejorar la resistencia de los muros estabilizándolos a través de elementos verticales de madera o bambú anclados en el sobrecimiento.

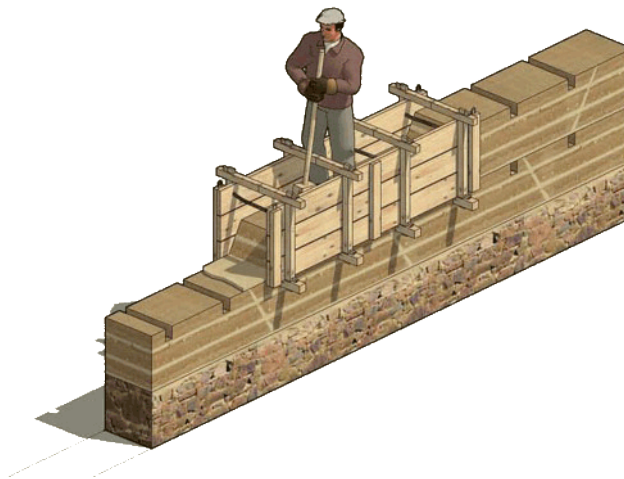


Figura 1.2 Construcción mediante la técnica tapial.

Quincha

Este Sistema consiste en un muro compuesto por un entramado de caña o bambú cubierto con barro, de tal manera que todos los elementos resistentes estén cubiertos al menos por 2 cm de mezcla, lo que le proporciona aislamiento a la vivienda. Tienen un buen comportamiento ante los sismos gracias a la elasticidad que le proporciona la caña, que absorbe las vibraciones. Su construcción ligera facilita su montaje, aminora las cargas de peso propio y en caso de colapso de la estructura no provoca un daño significativo.

Adobe

La técnica del adobe consiste en crear bloques macizos compuestos de arena, arcilla, paja y agua. Estos bloques se dejan secar al sol, lo que le proporciona cierta resistencia. A diferencia de la quincha y la tapia, este sistema no se compone por un muro ininterrumpido, sino que los bloques se unen mediante un mortero. Esta heterogeneidad típica de los muros de adobe hace que sea incluso más impredecible su comportamiento. Por otro lado, el adobe tiende a absorber la humedad atmosférica, lo que le hace perder gran parte de su capacidad resistente. Por lo tanto no es aconsejable construir con adobe en zonas cuyo clima sea húmedo o posea una alta densidad pluviométrica. El agua acumulada en el suelo tiende a ascender por capilaridad sobre el muro, por lo que es conveniente colocar un sobrecimiento antes de levantar el tabique. También se suelen cubrir con una capa aislante, que puede estar compuesta por cal, para protegerlo del agua de lluvia. En este sentido es común ver casas con amplios aleros, que permitan resguardar el muro. Como hemos expuesto anteriormente, el adobe, al ser una construcción de tierra cruda, posee una capacidad aislante y térmica encomiable, de hecho junto con el factor económico y ambiental, es su mayor atractivo.



Figura 1.3 Construcción mediante la técnica quincha.



Figura 1.4 Muro de adobe con sobrecimiento de piedra.

BTC

La técnica de los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) es muy similar a la producción de adobe, con la diferencia de que los primeros se someten a un prensado. Esto le proporciona mejores propiedades mecánicas y de regulación de la humedad. Frente a las técnicas modernas, supone un ahorro de energía a la hora de producirlos (la producción de bloques de tierra comprimida requiere en torno al 1 % de la energía necesaria para producir un ladrillo de construcción [1]). Los BTC suelen emplearse estabilizados con cal, cemento o yeso para mejorar sus propiedades; además, en torno a la mitad del CO_2 que se libera durante la producción de la cal, es reabsorbida por el bloque de tierra comprimida [1].

1.3 Historia, patrimonio e importancia social

1.3.1 Historia

En la antigüedad, la tierra fue considerada como uno de los cuatro elementos sobre los que se sustentaba nuestro planeta. Los orígenes de la construcción con tierra cruda se remontan a los primeros asentamientos humanos. Sin embargo, no tenemos muestra de ello hasta el siglo VII a.C., fecha de la que data la ciudad más antigua conocida de tierra, Çatalhöyük (Anatolia), situada en la región que actualmente conocemos como Turquía. Posteriormente, en la época de la civilización egipcia, se utilizaba tierra con limo del Nilo como aglutinante, para la construcción de viviendas y tumbas. Este material se ha utilizado desde la antigüedad en diferentes campos; tanto con fines bélicos, para construir murallas y castillos, como en el ámbito religioso e incluso en la agricultura, en forma de molinos y graneros.

Muchas de estas construcciones siguen en pie hoy en día, como por ejemplo la gran mezquita de Djenné (“la ciudad de barro” poblada desde el año 250 a.C.), en Mali. Otro maravilloso ejemplo es la ciudad de Shibam en Yemen, conocida como la Manhattan del desierto, cuyos edificios de adobe alcanzan los 30 metros de altura. España no es un país con abundante tradición de tales construcciones, no obstante, en regiones secas de la meseta central se ha desarrollado notablemente esta arquitectura, con yacimientos incluso de la edad de bronce. En el siglo XX este material ha sido desplazado con la llegada de materiales de construcción industrial pasando a considerarse como arcaico. No obstante, en la actualidad vuelve a renacer el interés de esta arquitectura debido a su sostenibilidad desde un punto de vista cultural, económico y ambiental.



Figura 1.5 Shibam, la Manhattan del desierto (Yemen).



Figura 1.6 Mezquita de Djeneé (Mali).

1.3.2 Patrimonio

Podemos encontrar conjuntos históricos, monumentos, centros urbanos, templos o paisajes culturales en los que la arquitectura de tierra es protagonista. Existen hasta 150 bienes construidos total o parcialmente con tierra inscritos en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO, lo que supone un 10% del total de éste [2]. Sin embargo, cada vez más amenazadas por los impactos naturales y humanos (inundaciones, terremotos, industrialización, tecnologías modernas de construcción...), las estructuras de tierra merecen una atención especial en términos de conservación y mantenimiento; aproximadamente el 25 % del patrimonio que está en peligro de destrucción es de tierra [2]. Estos bienes se encuentran en diversos lugares de los cuatro viejos continentes: Europa, América, África y Asia.

Restos de civilizaciones precolombinas como las ruinas de Chan Chan en Perú o la zona arqueológica Paquimé en Casas Grandes (México), son algunos casos representativos de este patrimonio. También son ejemplo de éste la mundialmente conocida Gran Muralla China o incluso un caso tan cercano como la Alhambra de Granada, construida con la técnica tapial, la cual debe su color tan característico a la arcilla roja que constituye sus murallas.

A causa de la inestabilidad estructural que afecta a buena parte del patrimonio de tierra, la UNESCO propone un programa (World Heritage Program of Earthen Architecture) que impulsa la investigación científica a favor del estudio de la conservación y restauración de estos bienes y fomenta el aumento de conferencias y publicaciones. Este programa fue aprobado en Nueva Zelanda en 2007.



Figura 1.7 Alhambra de Granada (España).

1.3.3 Importancia Social

El estudio de las características del material tierra es muy beneficioso para amplios sectores de la población. Sin embargo, el desarrollo de estos estudios no sale económicamente rentable para las grandes compañías. Por lo tanto, va avanzando paulatinamente a través de trabajos de cooperación y gracias al impulso de algunas universidades.

Las mejoras no sólo están justificadas por la simple justicia social, sino que también suponen la reducción de gastos en los que la comunidad internacional tiene que invertir después de una catástrofe. La falta de datos experimentales y la construcción artesanal de viviendas de tierra han llevado en numerosas ocasiones al colapso a una gran cantidad de edificios tras un terremoto. En los últimos años, se han estudiado diversas técnicas de refuerzo para mejorar las propiedades resistentes del adobe. Los trabajos desarrollados en la Pontificia Universidad Católica de Perú son una referencia internacional. En ellos se ha analizado el comportamiento sismorresistente de un muro de adobe a partir de ensayos de simulación sísmica sobre módulos de viviendas a escala real.

Se estima que hoy día un tercio de la población mundial vive en viviendas de tierra [3] [4]. Entre India y China hay más de 50 millones de este tipo de viviendas [5]. Puesto que las zonas donde

más abundan coinciden con las más pobres del planeta, es importante apoyar a la población más vulnerable con nuestros conocimientos para promover la equidad social en todo el mundo.

En términos estadísticos se puede decir que el sector de la construcción es el responsable del 50% de los residuos totales generados [6], de los cuales solo un 28 % es reutilizable o reciclable [7]. La tierra tiene la ventaja de ser un material ecológico, reciclable, que no genera residuos al final de su vida útil, lo que es muy beneficioso para el medio ambiente. Si a esto le sumamos el ahorro de energía que acarrea su producción y el asociado a su vida útil debido a sus capacidades aislantes, podemos deducir el gran alivio que supondría su uso para nuestro planeta.

1.4 Arquitectura sostenible

Desde un punto de vista arquitectónico y ecológico, la vivienda popular debe ser autóctona, para ello debe cumplir los siguientes requisitos:

- Estar conformada por materiales naturales del lugar (la humanidad ha construido a lo largo de su historia con los materiales que tenía a su alrededor: los esquimales construyen los iglús con bloques de hielo, los habitantes del desierto con tierra, los colonos americanos con troncos de los bosques...)
- Ser construída con métodos sencillos, así como tener la capacidad de ser reparada con los mismos materiales con los que fue edificada.
- Proteger al habitante de la intemperie y proporcionar seguridad

La tierra cumple con creces con todos estos requisitos, además las viviendas se funden con el paisaje de manera armónica, mimetizando con su alrededor. Esto supone que no necesita ser transformada industrialmente, ni ser transportada desde el lugar de extracción, evitando contaminar el medio ambiente. Además su producción no provoca la aparición de partículas tóxicas en el ambiente, lo que conlleva a que sus habitantes tengan una vida más saludable.

La inercia térmica de los muros construidos con tierra reduce o incluso evita el uso de sistemas de climatización, lo que supone un ahorro de emisiones de CO₂ muy importante. Una vivienda construida con adobe o tapial que cuente con alguna técnica ecológica de climatización, podría llegar a prescindir totalmente de sistemas de calefacción que consuman combustibles.

Por otro lado es un material versátil: permite su uso en diferentes tipos de construcción según gustos o necesidades del propietario y proporciona a la construcción diversos tipos de acabados en forma de color, textura o calidez; también puede ser combinado con el hormigón, proporcionando un estilo vanguardista a la edificación. Hoy en día la sociedad tiende a involucrarse con medidas ecológicas, y la arquitectura sostenible es una buena herramienta para lograr reducir el impacto humano sobre el planeta. Cada vez se ven más soluciones de edificios con cubierta vegetal. Algunos arquitectos incluso están combinando las construcciones de tierra con una arquitectura modernista. Buenos ejemplos de ello son la Capilla de la Reconciliación en Berlín o la residencia Tucson en los EEUU.

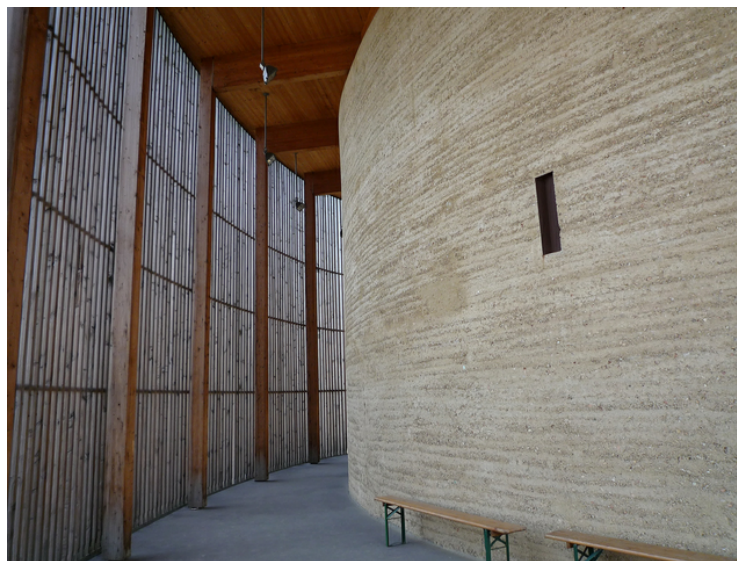


Figura 1.8 Capilla de la reconciliación (Berlín, Alemania).

1.5 Antecedentes de investigación acerca del adobe en Sevilla

La investigación que abarca el comportamiento del adobe en la Universidad de Sevilla, y más concretamente en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, ha sido llevada a cabo por el profesor contratado Doctor Mario Solís Muñiz, quien aparte de tutelar el presente trabajo, ha sido tutor anteriormente de los alumnos Miguel Romero, Sergio Astorga y Gonzalo Montoya en sus proyectos de fin de carrera.

Estos proyectos se basan en el análisis numérico del comportamiento a flexión o ante cargas cíclicas de la mampostería de adobe reforzado con geomalla, que recubre las construcciones aportando mayor ductilidad y resistencia al conjunto. Estos estudios se hicieron en colaboración de la Pontificia Universidad Católica de Perú, la cual ofreció los resultados de su campaña experimental a los alumnos y permitió contrastar el análisis numérico con los resultados experimentales.

Por otro lado, han supuesto una parte importante de este proyecto los compañeros de TAPH TAPH, que es una asociación sin ánimo de lucro la cual se dedica a fomentar la bioconstrucción. Jorge Moya, Arturo Jiménez y Juan Javier Usero han sido los responsables de la elección de la tierra adecuada y su dosificación. A través de pruebas de campo y laboratorio han conseguido seleccionar la mejor tierra para nuestro proyecto.

Jacinto Canivell y Ana González han colaborado también con nosotros. Ambos cuentan con publicaciones de interés en el ámbito de la construcción con tierra, con colaboraciones en revistas de renombre como informes de la construcción.

1.6 Descripción de los ensayos

Los ensayos que hemos llevado a cabo durante la campaña han sido de compresión simple únicamente. En principio queríamos abarcar ensayos de compresión diagonal de muretes que nos diesen la resistencia del material ante esfuerzos tangenciales, pero finalmente la limitación de tiempo nos lo impidió.

Los bloques individuales se han fabricado con un molde de dimensiones 80x160x320 mm. Las pilas, por su parte, están conformadas por seis filas que cuentan con una unidad y media cada una, lo que produce unas dimensiones reales aproximadas (teniendo en cuenta las juntas) de 580*520*160 mm. El mortero de las juntas entre unidades está compuesto por el mismo material que las piezas, con la misma dosificación.



Figura 1.9 Unidades de adobe.

El ensayo de las pilas ha sido estándar, con velocidades de carga y dimensiones del espécimen similares. La normativa en la que nos hemos basado para establecer la velocidad de carga y las dimensiones de la pila, así como la disposición de los sensores, es la UNE-EN 1052-1 “*Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Determinación de la resistencia a compresión.*”



Figura 1.10 Pila de adobe.

Sin embargo, para caracterizar la resistencia a compresión simple de una unidad hemos tenido algunas dificultades. Para la confección de los ensayos hemos seguido la norma UNE-EN 772-1 “*Métodos de ensayo de piezas para fábricas de albañilería. Determinación de la resistencia a compresión.*”

En un principio hemos ensayado unidades enteras, tanto en su posición horizontal como transversal. Estas unidades no tenían sus caras planas, debido a la retracción heterogénea que sufren los bloques, lo que nos impedía cargar toda la cara simultáneamente, produciendo exceso de tensiones en unos puntos concretos. Además, el bloque apoyado horizontalmente posee una esbeltez demasiado baja, lo que permite al material trabajar como un medio continuo dúctil en lugar de frágil, en el que además no se produce rotura. Esta disposición de los bloques dio como resultado unas curvas Fuerza-Desplazamiento que era siempre creciente, en lugar de tener un máximo en la fuerza como es lógico.

Después ensayamos probetas cortadas de las propias unidades, tanto cúbicas como en forma de prisma rectangular, en adelante prismáticas. Estas probetas nos dieron un mejor resultado, con una curva parecida a la curva del hormigón, un tramo elástico y uno plástico hasta la rotura.

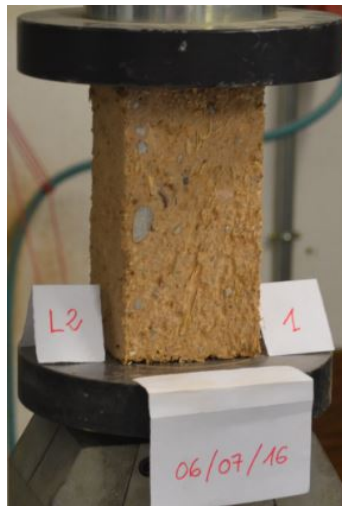


Figura 1.11 Prisma rectangular.

Por último, ensayamos también tres probetas cilíndricas, de altura 300 mm y 150 mm de diámetro.



Figura 1.12 Probeta cilíndrica.

2 Composición y elaboración de mampostería de adobe

El adobe se compone de una mezcla compuesta por arena, finos (tanto limo como arcilla), paja y agua. Las proporciones de cada uno de los componentes son variables, las recomendaciones dependen del lugar de producción. Existe gran disparidad de criterios a la hora de proponer una dosificación adecuada del adobe. Es frecuente utilizar suelos que contengan entre un 55 y un 75 % de arena, y entre un 25 y un 45 % de finos. Por otro lado, es importante que la mezcla no contenga materia orgánica.

La relación arcilla-arena del suelo es de gran importancia para el adobe debido a que, si no hay suficiente arcilla en la mezcla no se conseguirá la cohesión necesaria de todas las partículas y se desmorona. Por el contrario, si no hay suficiente arena, el ladrillo se fisura por retracción de la arcilla durante el proceso de secado [8]

La fibra orgánica también presenta gran importancia debido a que limita las variaciones de volumen que se producen en el adobe durante el proceso de retracción.

2.1 Selección de tierras

El proceso de selección de tierras es una tarea que debemos procesar mediante una secuencia que contenga tanto pruebas de campo como pruebas de laboratorio. Las pruebas de campo se realizarán in situ y se llevarán a cabo del siguiente modo:

2.1.1 Pruebas de campo

Pruebas que permiten conocer la calidad del material

- Método de la bolita: Se determina si el suelo tiene la resistencia adecuada. Se forman tres bolas de 2 cm de diámetro y se dejan secar. Después se aprieta cada bola con los dedos pulgar e índice, y si esta no se rompe, el suelo es adecuado para su uso en construcción. Si alguna de las bolitas se rompe, el suelo no es adecuado, ya que carece de la cantidad suficiente de arcilla.



Figura 2.1 Método de la bolita.

- **Método del rollo:** Se lleva a cabo para determinar si la plasticidad del suelo es la correcta. Hacemos un rollo de 20 cm de largo y 1 cm de diámetro. Se desliza el rollo de modo que su extremo quede colgando. Si la longitud sin romperse está entre 5 y 15 cm, el suelo es adecuado. Si se rompe con menos de 5 cm, el suelo no debe ser usado. Si la longitud sin romperse del rollito es mayor de 15 cm, se debe añadir arena.

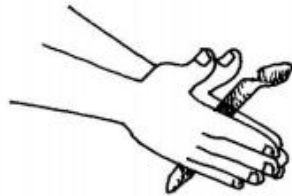


Figura 2.2 Método del rollo.

- **Método de la botella:** Sirve para determinar la proporción de los materiales que componen el suelo. Consiste en llenar una botella vacía con agua hasta la mitad de su volumen y suelo hasta que se complete el llenado de la botella y agitarla hasta que quede una mezcla homogénea. Debido al diámetro de las partículas, primero sedimentará la arena, luego el limo y por último la arcilla, quedando claramente diferenciados los componentes.

Pruebas organolépticas

- **Prueba del olor:** Esta prueba tiene por objeto identificar por su olor la presencia de materia orgánica.
- **Prueba de la mordedura:** Con esta prueba es posible detectar por medio del rechino del material entre los dientes el contenido de arenas y limos de los suelos. Si al aplastar el material con los dientes no rechina será suelo arcilloso; si rechina pero ligeramente, es suelo limoso; si rechina desagradablemente, es arenoso.
- **Prueba del color:** Mediante esta prueba se puede apreciar el tipo de suelo según el color observado. Los colores claros y brillantes son característicos de suelos inorgánicos
- **Prueba del tacto:** En esta prueba se manifiestan mediante el tacto las partículas contenidas en los suelos. Un suelo con alto contenido en arenas será más rugoso que uno con alto contenido en finos.

2.1.2 Pruebas de laboratorio

Una vez realizadas las pruebas de campo se procede a la realización de las pruebas de laboratorio, que se basan en el estudio de la granulometría del material mediante tamizado y sedimentación, así como en la obtención del índice de plasticidad, el límite líquido y el límite plástico. La granulometría óptima se ha comentado anteriormente. En cuanto a la plasticidad, para la mezcla de adobe es conveniente utilizar suelos con bajo índice de plasticidad, ya que cuanto más alto sea, mayor será la cantidad de agua contenida en la masa que lo convierte en moldeable, y una vez seco, se tendrán mayores retracciones [9][10]. Es recomendable que los suelos utilizados para elaborar adobe presenten un límite líquido entre 20 y 40 y un límite plástico inferior a 20 [11]. En España, el análisis granulométrico está estandarizado mediante la norma UNE 103101 : 1995, la determinación del límite líquido con el aparato de casagrande por la UNE 103103 : 1995 y la determinación del límite plástico por la UNE 103104.

2.2 Elaboración de los bloques de adobe

Todo el proceso de selección de tierras fue llevado a cabo por los compañeros de la asociación Taph-Taph, quienes tienen experiencia en el campo de la construcción con tierra cruda. Este proceso se llevó a cabo del siguiente modo:

Tras el mapeado de explotaciones mineras activas cerca del núcleo urbano de Sevilla, se extraen doce muestras representativas en un radio de 50 km. Una vez realizadas las pruebas de campo, se seleccionan cinco tierras, las consideradas más idóneas. Con éstas cinco tierras seleccionadas se procede a realizar las pruebas de laboratorio. Las características buscadas son:

- La mínima variación de la dosificación de la granulometría
- Tener un tamaño máximo de árido menor de 5 mm
- Cercanía de la explotación, que va relacionada con la menor emisión de CO₂ al medio ambiente.
- Límites líquido y plástico dentro del rango recomendado

Una vez seleccionada la tierra y realizadas las pruebas de campo y laboratorio, el porcentaje de arena existente en la tierra seleccionada fue de un 40.95 %, por lo que se hizo necesaria su adición. Se propuso llegar a un 60 % sobre el total, reduciendo a un 40 % el contenido de finos. Esto se consigue añadiendo una dosis de arena por cada dos de tierra seleccionada. Por otro lado, se propone un tamaño máximo de árido de 5 mm, el cual tan sólo es superado por el 1 % del total, así pues, no se consideró oportuno el tamizado de la tierra.

El límite líquido de la tierra seleccionada es 23,1 y su límite plástico 17,2. Estos valores cumplen con el rango recomendado.

La paja que se añadió fue la correspondiente a un 1 % del peso de la mezcla total. Estimando un peso específico de 19 kN/m³ para la mezcla final, es sencillo calcular la dosificación de paja requerida conociendo el volumen de mezcla necesario. Por otro lado, baremar la cantidad de agua necesaria fue una tarea algo más complicada. Desde TAPH TAPH se propone añadir un 30 % en peso, pero según su experiencia, los valores óptimos variaban en función de la humedad inicial de la tierra, la evaporación o las posibles pérdidas durante el proceso de mezclado.

A partir de entonces, se tomó el relevo desde la escuela de ingeniería. Mi incorporación fue algo tardía, lo que impidió mi participación en la confección de los bloques. También se contó con la ayuda de Emilio Gómez, encargado del laboratorio de estructuras de la escuela de ingeniería.



Figura 2.3 Dosificación final.

Una vez finalizado el proceso de dosificación de las tierras, se procedió a la confección de los bloques de adobe. Se comenzó mezclando la tierra y la arena para conseguir la dosificación adecuada,

y se añadió paja de 5 cm de longitud como máximo, así como agua. La paja de la que dispusimos era algo más larga de lo recomendado, por lo que se hizo necesario su cortado.



Figura 2.4 Cortado de la paja.

Tras encontrar una superficie que impidiese el desborde de la mezcla, se pasó a verter todos los materiales sobre ella, y se mezclaron con los pies hasta que la masa quedase uniforme. Puesto que con los pies no quedó suficientemente homogénea, se recurrió a la ayuda de una soleta, como podemos ver en la figura 2.5. Por último, se dejó reposar el adobe durante 24 horas.



Figura 2.5 Mezclado de los componentes.

Para la elaboración de los bloques fue necesario disponer de un molde de madera que actuase como encofrado (gravera). Esta gravera debe estar húmeda y espolvoreada para evitar que el barro se pegue a las paredes interiores. Debe ser rellena mediante bolas lanzadas con fuerza, para que el material quede lo más compacto posible, después se enrasa y se retira el molde.

El siguiente paso, fue dejar secando los adobes durante un periodo de tiempo cercano al mes,



Figura 2.6 Rellenado de la gravera.

protegidos de la lluvia. Es recomendable colocarlos de costado pasado un tiempo para que se sequen mejor.



Figura 2.7 Colocación de los bloques de costado.

Pasado dicho periodo, se comprobó la resistencia de los bloques. La prueba consiste en colocar un ladrillo de adobe sobre otros dos, dejando un vano libre y que una persona se coloque encima de tal vano. El bloque superior debe soportar el peso de una persona durante un minuto para asegurar su buena resistencia.

Para llevar a cabo nuestro proyecto, se plantearon dos conjuntos de ensayos: los ensayos preliminares y los finales. Los primeros fueron necesarios para configurar las máquinas de ensayo y la construcción de útiles para el manejo de los especímenes, pudiendo hacer las modificaciones necesarias durante su realización.

En total fueron necesarias veintidós unidades y media para cada murete y nueve unidades por cada pila, lo que hicieron un total de doscientas veintiuna unidades finales y sesenta y tres del tipo preliminar. Por cada unidad se obtuvo un volumen teórico de:

$$V = 0.32 * 0.16 * 0.08 = 0.004096m^3$$



Figura 2.8 Prueba de resistencia de los bloques.

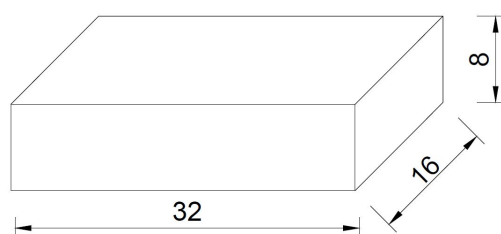


Figura 2.9 Dimensiones teóricas del bloque de adobe. Unidades en cm.

Tales dimensiones para los bloques se han tomado basadas en las recomendaciones de la norma peruana E.080, según la cual:

- Para adobes rectangulares, el largo será aproximadamente el doble del ancho.
- La relación entre el largo y la altura debe ser del orden de 4 a 1.
- En lo posible, la altura debe ser mayor a 8 cm.

Conociendo el volumen teórico necesario por cada bloque de adobe y las unidades necesarias para realizar los ensayos, se calculó, un volumen de $0,9052 \text{ m}^3$ de adobe de la segunda tirada y $0,2577 \text{ m}^3$ para la primera, de los que $2/3$ serán tierra arcillosa y $1/3$ de arena.

Con lo que se elaboraron un total de 200 bloques preliminares el día 29 de marzo de 2016 y 300 bloques finales el día 5 de abril. Para estos últimos disponíamos de más experiencia en lo que a confección se refiere. El número de bloques elaborados fué tal, que aparte de cubrir las unidades necesarias para los ensayos de pilas y muretes, nos dejó un amplio margen para ensayar probetas a compresión simple y así definir el comportamiento de material a compresión, sin la intervención de las juntas.

Adicionalmente, el segundo lote (el de los bloques finales), tiene una peculiaridad. Ésta consiste en que el tamaño de paja es menor, pues se consideró que el del primer lote era excesivo con respecto al tamaño del bloque.

Del segundo bloque se escogieron cuatro unidades para realizar un control sobre ellas de la pérdida de peso asociada a la evaporación de agua que sufre el material. Los pesos de tales bloques se fueron anotando durante un mes y los resultados fueron los que se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Evolución en peso de cuatro bloques de adobe durante un mes.

Unidad	14/04/16	19/04/16	26/04/16	09/05/16
1	8,7 kg	8,4 kg	8,3 kg	8,3 kg
2	8,9 kg	8,6 kg	8,5 kg	8,5 kg
3	8,8 kg	8,2 kg	8,1 kg	7,9 kg
4	8,6 kg	8,4 kg	8,3 kg	8,2 kg

El peso medio por bloque después de un mes de secado fue de 8,2 kg. Dividiendo tal resultado entre su volumen teórico, se obtuvo un peso específico medio de $19,6 \text{ kN/m}^3$, parecido al que habíamos estimado en un principio.

Al mismo tiempo que se fabricaron los bloques de adobe, y con la misma mezcla, se realizaron probetas cilíndricas y cúbicas. Algunas de estas probetas se ensayaron a compresión simple durante mi estancia en el proyecto. No obstante, se pretende ejecutar algún ensayo brasileño o de tracción indirecta en fechas futuras.

En total se ejecutaron:

- Nueve probetas cilíndricas de dimensiones $150 \times 300(\text{mm})$ [ϕ , h], la cuál es la dimensión estándar para obtener la resistencia a compresión en el hormigón.
- Cinco probetas cilíndricas de dimensiones $80 \times 160(\text{mm})$ [ϕ , h]
- Ocho cubos de dimensiones $90 \times 90 \times 90(\text{mm})$

**Figura 2.10** Ejecución de probetas cúbicas y cilíndricas.

2.3 Confección de la mampostería de adobe

Los ensayos sobre la mampostería de adobe se consideran un símil representativo del comportamiento que pueda tener el tabique de una vivienda, pues ambas esbelteces guardan una relación semejante. Además, también se simula la junta de unión entre bloques, que es lo que suele fallar antes en caso de colapso. Una vez pasado un período de 28 días [12] [13] de secado de los adobes, ya era posible comenzar a fabricar los especímenes.

La mampostería a ensayar se compone por:

- Pilas. Ensayadas a compresión simple.
- Muretes. Ensayados a compresión diagonal, siendo estos ensayos concernientes a trabajos que se realizarán el próximo año.

Las dimensiones teóricas para muretes y pilas se muestran en la figura 2.11.

Para ambos tipos de ensayos se construyeron 9 especímenes, dos de carácter preliminar y siete de carácter final.

Contando con una junta de 1,5 cm, los muretes tienen una dimensión teórica casi cuadrada. Tal geometría es necesaria para ensayos de compresión diagonal, pues evita que se produzca una excentricidad en la carga. Finalmente, las juntas fueron algo mayores. Los bloques, por su parte, también tuvieron unas dimensiones algo mayores de las esperadas, debido a la rebaba que se produce cuando retiras un encofrado y el material no se encuentra en un estado completamente sólido.

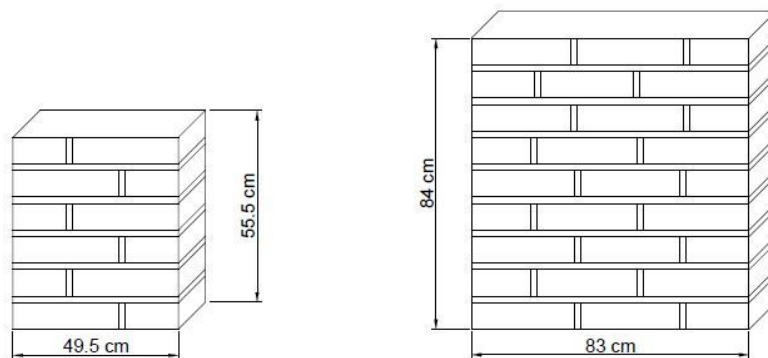


Figura 2.11 Dimensiones teóricas de pilas y muretes.

Como se puede apreciar en la figura 2.11, es necesario el corte de medias unidades para ajustar las dimensiones. Por cada murete hacen falta nueve medias unidades y seis por cada pila. En primera instancia, se decidió cortarlas con una segueta, pero no daba buen resultado. Por ello, procedimos a utilizar una sierra circular eléctrica. Ésta sierra también fue empleada para cortar los prismas rectangulares y los cubos.

Teniendo clara la distribución de los bloques se pasó a calcular el volumen de mortero que fué preciso fabricar para los especímenes involucrados. En un principio, se estimó que el volumen necesario sería un 5 % del que utilizamos para los bloques, pero en la práctica se observó que era insuficiente. Entonces se calculó el volumen necesario por juntas a partir del conocimiento de las dimensiones que tendrían, y tal resultado fue mucho más aproximado al volumen real que fué necesario elaborar.

La dosificación del mortero fue la misma que la de los bloques. Se procedió al mezclado de los componentes y se dejó secar durante 24 horas.



Figura 2.12 Corte de unidades.



Figura 2.13 Piscina de mortero.

Una vez pasado dicho tiempo y justo antes de emplear el mortero como aglomerante, se utilizó un batidor mezclador eléctrico para homogeneizarlo

La fabricación del mortero se dividió en tres días, puesto que se creyó conveniente no levantar más de tres filas de bloques por día. Ésto se debe a que el peso de las siguientes filas comprimiría las primeras juntas, ya que necesitan un tiempo considerable para tomar consistencia.

Todos los especímenes se fabricaron a la vez, las nueve pilas y los nueve muretes. La construcción de los muretes y pilas se llevó a cabo sobre una fila de ladrillos convencionales, pues propiciaría facilidad de manipulación a la hora de trasladarlos.

Para tener evidencia de la correcta colocación de los bloques, se fué comprobando con un nivel que cada cara del espécimen fuese plana y paralela a sus homólogas. Lo vemos en la figura 2.15. También se revisó que cada junta no midiese más de 2 cm, tal como recomienda la norma peruana E.080, con un indicador de poliestireno expandido (porexpan).

El método de ejecución de cada bloque, fue humedecer la cara del mismo que iba a entrar en contacto con el mortero para así aumentar su adherencia.

El proceso de construcción de los muros y pilas se llevó a cabo entre el 26 de abril y el 6 de mayo del presente año (2016). Se hicieron tandas de 270 kg de mortero en los dos primeros días de construcción. En el tercero, puesto que ya se había terminado el proceso de fabricación de las pilas, sólo fueron 180 kg.

Con ello se finalizó el periodo de construcción de la mampostería, dejándola lista para el ensayo, a expensas del tiempo de secado del mortero. Respetando el mínimo que indica la norma ASTM E519, los muretes deben tener un tiempo de curado de al menos 28 días.



Figura 2.14 Comprobación de la correcta anchura de junta.



Figura 2.15 Nivelación de la cara superior del murete.



Figura 2.16 Pilas y muretes finalizados.

3 Preparación de los ensayos

El proceso de preparación de los ensayos se ha llevado a cabo durante el mes de mayo del presente año (2016). Éste ha consistido en la fabricación y puesta a punto del utillaje que habríamos de utilizar para llevar a cabo los ensayos.

3.1 Calibración de sensores

Para llevar a cabo los ensayos de compresión simple y compresión diagonal es fundamental que obtengamos el desplazamiento de la probeta y la fuerza aplicada en todo momento, que son cuantificados por la máquina que aplica la carga.

Sin embargo, para cuantificar con suficiente precisión el desplazamiento del espécimen, es necesario disponer de unos transductores de desplazamiento. Esto se debe a que el desplazamiento que sufre el pistón de la máquina no es suficientemente revelador, pues no nos ofrece los diferentes desplazamientos relativos que se producen en cada cara, lo que puede dar lugar a que se produzca flexión y no sea identificada. Además, hay un periodo de adaptación de la cara plana del pistón con la sección superior irregular del espécimen, lo que provoca en la curva Fuerza-Desplazamiento un tramo poco representativo en el que la curva es prácticamente horizontal.

En la medida de lo posible, se ejecutaron los ensayos con transductores de desplazamiento. Los transductores que se utilizaron son LVDT (transformador diferencial de variación lineal) y HBM de rangos variados.

Los sensores de desplazamiento mandan una señal en forma de diferencia de voltaje a medida que una varilla que llevan en su interior se va desplazando. Nuestra tarea es, mediante un software informático (LabVIEW), transformar esa diferencia de potencial en desplazamientos.

Para ello, es necesaria la pendiente Diferencia de Potencial-Desplazamiento de cada uno de los sensores, que viene facilitada por el fabricante. No obstante, se decidió hacer una calibración propia para cerciorarnos de la correcta transformación de los datos. De hecho, la calibración fue incluso necesaria para algunos de los sensores, pues no disponíamos de sus hojas de calibración.

La calibración se hizo con la ayuda de un calibre digital fijo. Se fueron anotando tanto el desplazamiento parcial como la diferencia de potencial asociada a ese desplazamiento en una serie de puntos.

En concreto, los sensores que han sido calibrados son los siguientes:

- 2 HBM de rango 20 mm
- 2 LVDT de rango 0,5" = 12,7 mm
- 2 LVDT de rango 1" = 25,4 mm
- 1 LVDT de rango 2" = 50,8 mm

- 1 LVDT de rango 4 " = 101,6 mm

El rango más conflictivo, y el que a la vez más nos interesaba, comprendía los valores entre 0 y 2 mm. Para tal rango tomamos medida en veinte puntos, cada 0,1 mm.

También se tomaron diez puntos sobre el rango total (R) de cada sensor, cada $R/10$ mm.

Con tales resultados, se procedió a realizar una recta de regresión lineal por ajuste de mínimos cuadrados.

$$Y = ax + b$$

Donde :

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

Una vez obtenidos los coeficientes que definen las diferentes rectas de regresión, determinaremos la calidad del modelo a través del coeficiente de determinación. Este coeficiente varía entre cero y uno, cuanto más exacta sea la recta de regresión, más próximo a uno será el coeficiente.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum (ax_i + b - y_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

Como podemos apreciar en la figura 3.1, que muestra el ajuste por mínimos cuadrados de los sensores de desplazamiento HBM, la recta de regresión fue suficientemente representativa. La pendiente obtenida "a", se utilizó más adelante para convertir la diferencia de potencial en desplazamientos de la varilla.

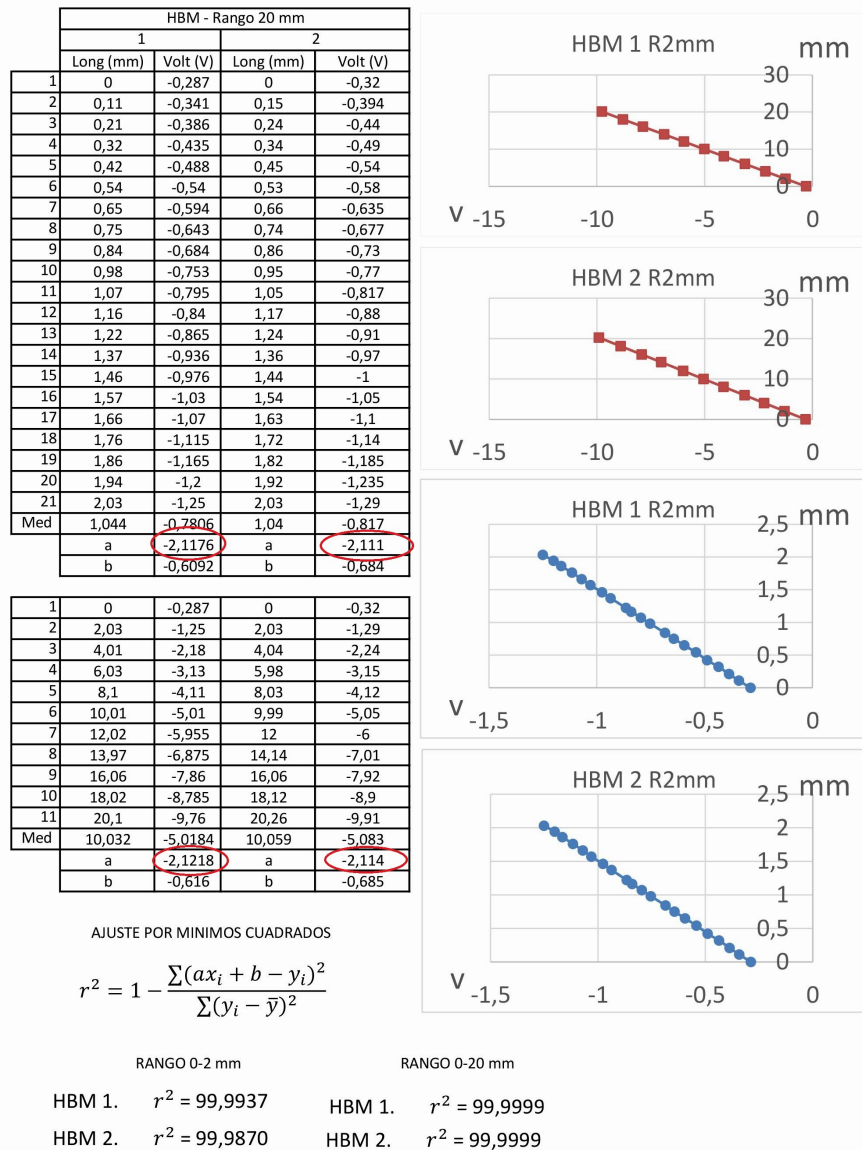


Figura 3.1 Ejemplo de calibración por mínimos cuadrados.

3.2 Fabricación y preparación del utillaje

Durante el curado de los especímenes, era necesario dejar todo a punto para poder ejecutar los ensayos sin demora. La mayoría del utillaje que preparamos era concerniente a los ensayos de muretes, que eran los más complejos de ejecutar.

El método de transporte de los muretes se puede observar en la figura 3.2.

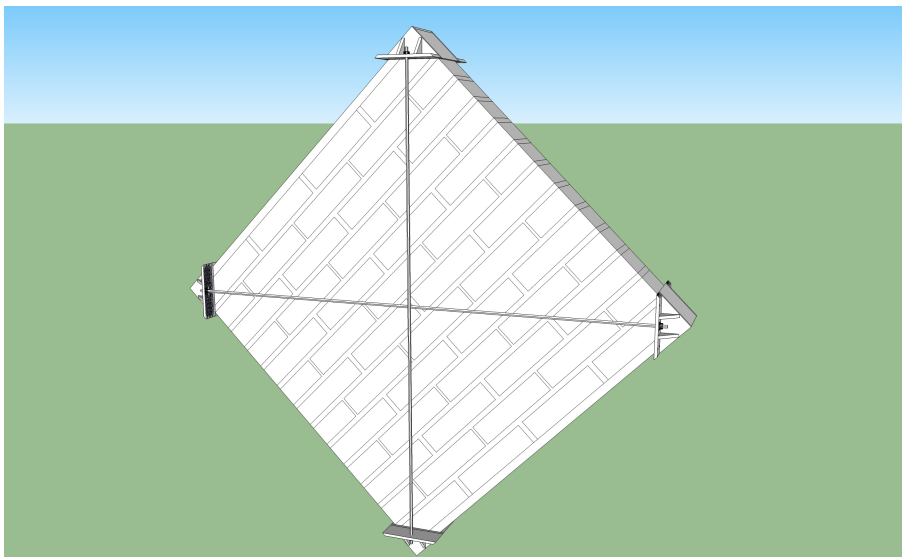


Figura 3.2 Sistema para el transporte de los muretes.

Para poder obtener tal estructura eran necesarios los siguientes materiales:

- Cuatro ángulos de sujeción del murete. Dos de ellos tendrían que contar con un cabezal de encaje que se ajustase al perfil y permitiese una correcta aplicación de la carga sobre su cara plana.

Éstos se fabricaron a partir de la soldadura de unos perfiles comerciales en L de 60 mm de ala. Esta dimensión estaba restringida por las indicaciones de la norma de Nuevo México NMX-C-464-ONNCCE-2010, según la cual, el útil aplicador de la carga debe tener una dimensión inferior al canto de un bloque, 80 mm en nuestro caso.

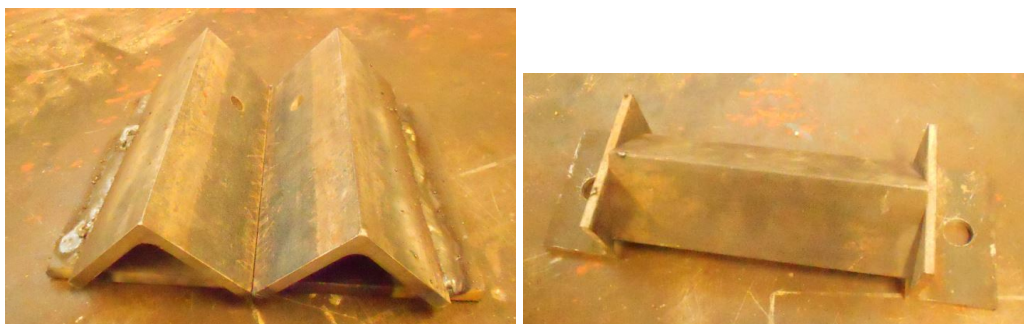


Figura 3.3 Sistema de sujeción del murete con placa de aplicación de la carga.

- Cuatro varillas roscadas para mantener comprimido el murete durante su transporte.

En cambio, el sistema de transporte utilizado para las pilas (figura 3.4) era más sencillo, únicamente precisó de cuatro tacos pasantes de madera, con cuatro varas roscadas del $\phi 23$.



Figura 3.4 Sistema de transporte para las pilas.

También fue necesaria la obtención de una placa de reparto de la carga con un neopreno, para evitar que la irregularidad de la cara superior de la pila diese lugar a una compresión no homogénea.

Recurrimos además a la inclusión de una capa de yeso, tanto en la cara inferior como en la cara superior de la pila por la misma razón.



Figura 3.5 Ejecución de la capa de yeso.

Otra cuestión a debatir fue la necesidad de fijar los sensores de desplazamiento a la pila, para

poder medir desplazamientos relativos. Se hicieron varias pruebas con yeso, silicona y cola blanca, pero ninguno de los adhesivos pareció cumplir con las condiciones que se le requerían.

En el caso del yeso, que parecía la opción más factible, cedía el agua con la que se mezcla, penalizando la adherencia entre ambos materiales.



Figura 3.6 Prueba de adherencia sobre un bloque de adobe con yeso, cola y silicona.

Los útiles que vemos en la parte izquierda del bloque de adobe de la figura 3.6 son las abrazaderas que fijaron los transductores colocados en posición horizontal.

Para los transductores que se encontraban en posición vertical, se han utilizado abrazaderas metálicas para tubos rígidos, como queda reflejado en la figura 3.7.



Figura 3.7 Elementos de fijación de un transductor HBM situado en posición vertical.

De este modo, optamos por una solución atornillada de los elementos de fijación, pues comprobamos que no repercutía significativamente sobre el comportamiento del material, como más tarde se corroboró en los ensayos.

En cuanto a la necesidad de adherir las varillas a las pletinas para que no se produzcan desplazamientos relativos, se ha utilizado un pegamento de unión, en concreto el adhesivo rápido de dos componentes X60.

Siendo necesario asegurar los sensores de desplazamiento ante una posible caída de material, fueron afianzados mediante unas tanzas de nylon anudadas a sus abrazaderas, y hechas fijas al puente grúa que se utilizó para realizar los ensayos.

La figura 3.8 muestra una pila preparada para ser ensayada, con todos sus transductores fijos, las tanzas aseguradoras de los transductores, la placa del reparto y el neopreno.



Figura 3.8 Pila preparada para la ejecución del ensayo.

3.3 Confección de las probetas

Para realizar un análisis del comportamiento a compresión simple del material, sin juntas de mortero, comenzamos ensayando bloques completos en su posición horizontal, lo cual no dió un buen resultado.

La curva característica de estos ensayos era siempre creciente. Esto fue debido a que la esbeltez asociada era demasiado baja, lo que hacía que el material no rompiese, sino que únicamente se compactase.

Podemos apreciar la ejecución de un ensayo y su curva Tensión (σ) - Deformación (ε) en las figuras 3.9 y 3.10



Figura 3.9 Ejecución de ensayo de una unidad en posición horizontal.

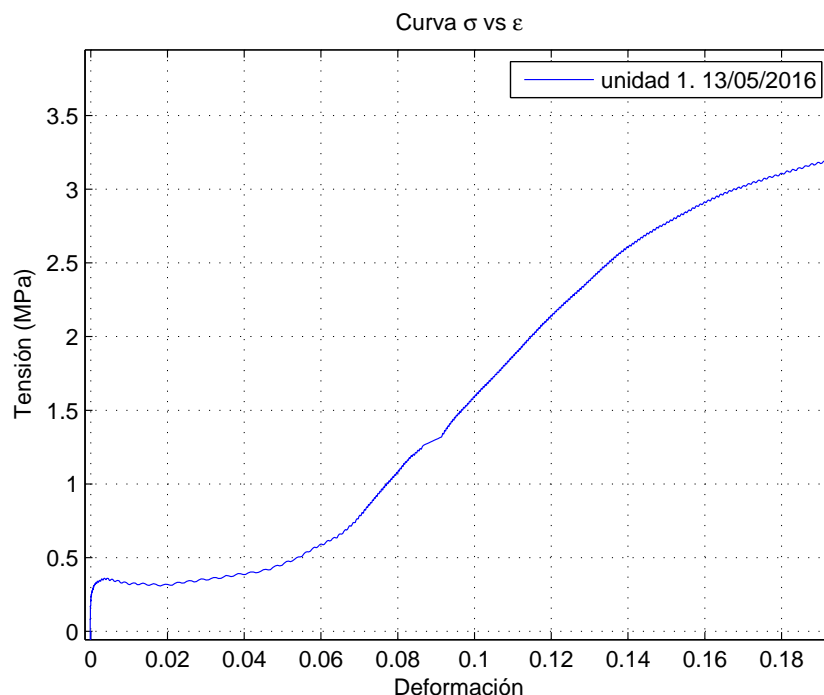


Figura 3.10 Curva Tensión-Deformación del ensayo de una unidad en posición horizontal.

En el primer tramo de la curva observamos un pico de tensiones. Más tarde, vemos un tramo asociado al asentamiento del aplicador de la carga sobre la cara superior de la unidad, con una

pendiente suave. Y por último, vemos cómo la curva crece sin llegar nunca a un máximo, pese a que la unidad se encontraba desmoronada.

La siguiente propuesta que llevamos a cabo fué la de ensayar las unidades en posición transversal con respecto al plano al que pertenecen sus dos ejes principales.

Sin embargo, tampoco esta opción resultó lo bastante satisfactoria, debido mayoritariamente a que las irregularidades que poseen los bloques no permiten que el aplicador pueda distribuir la carga uniformemente. Además, y por la misma causa, se pueden introducir flexiones que falseen los resultados asociados a la compresión simple.

En las figuras 3.11 y 3.12, se presentan tanto la disposición en la ejecución como la curva $\sigma - \epsilon$ resultante.



Figura 3.11 Ejecución de ensayo de una unidad en posición vertical.

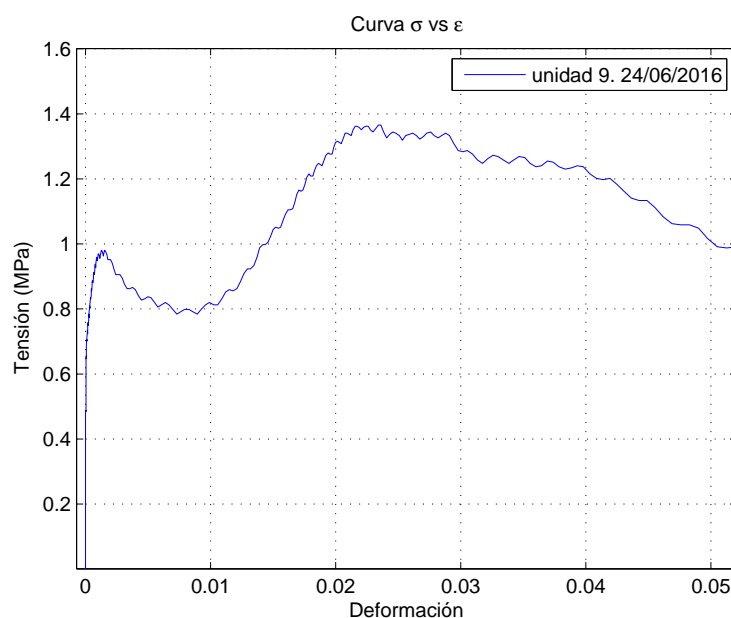


Figura 3.12 Curva Tensión-Deformación del ensayo de una unidad en posición vertical.

Ambos ensayos fueron realizados con control en desplazamiento. En total se ensayaron ocho unidades en posición horizontal y seis en posición transversal. Los resultados fueron similares para

todos los ensayos en cuanto a la forma de la curva.

El primer máximo que se aprecia en los ensayos de unidades se asocia a la geometría de los bloques, que en alzado tienen una forma parecida a la que se muestra en la figura 3.13.

En el caso de los bloques en posición transversal, la cara más ancha del bloque sufriría un aumento de tensiones focalizadas.

En los que respecta a los bloques en posición horizontal, el área efectiva al principio del ensayo es mucho menor que el área teórica nominal, pues la retracción provoca que por el centro, el bloque tenga un espesor menor que por los bordes.

Ambos casos generan una rotura parcial de la pieza. Esta rotura sería la responsable del primer máximo de la curva. No obstante, el material seguiría soportando esfuerzos con una superficie plana sobre la que aplicar la carga hasta la rotura del mismo.

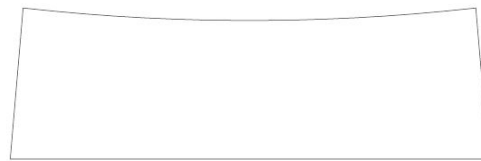


Figura 3.13 Geometría aproximada de los bloques desde el alzado.

Puesto que ninguna de las dos tipologías de ensayos eran lo suficientemente satisfactorias para definir el comportamiento a compresión simple del material, se opta por fabricar unas probetas, tanto cúbicas como en forma de prisma rectangular, a partir de los bloques.

Las dimensiones de los prismas eran de $80 \times 80 \times 150(mm)$ y las de los cubos $80 \times 80 \times 80(mm)$. Las probetas se cortaron con la misma sierra radial eléctrica que se utilizó para la confección de las medias unidades. En total se elaboraron dieciséis prismas y veinticinco cubos.



Figura 3.14 Procedimiento de corte de las probetas.

Los ensayos que se realizaron con ambos tipos de probetas fueron satisfactorios. Las curvas obtenidas se correspondieron a las de un material frágil, con una resistencia a compresión aproximada de 1.2 MPa (se pasará a estudiar en el capítulo de análisis de resultados). Conforme a diversos estudios, esta resistencia varía dependiendo del método de fabricación y la dosificación del material. La tabla comparativa 3.1, tomada de un artículo publicado en Portugal [14], muestra diferentes valores de resistencia a compresión simple según varios autores.

Tabla 3.1 Diferentes valores de la resistencia a compresión simple según varios autores.

Autor	Resistencia a compresión simple
Portugal(Varum et al., 2014)	0,47 MPa
México(Meli, 2005)	0,51-1,57 MPa
Colombia(Yamín et al., 2007)	2,84 MPa
Perú(San Bartolomé and Pehovaz, 2005)	2,94 MPa
Italia(Liberatore et al., 2006)	0,29-1,56 MPa
China(Wu et al., 2013)	1,66 MPa



Figura 3.15 Probetas cúbicas y prismáticas preparadas para ser ensayadas.

Una vez explicado el proceso de puesta a punto de los ensayos, pasaremos a explicar las decisiones que hemos tomado en cuanto a las dimensiones de los especímenes y las probetas, así como a las velocidades y rampas de carga, a partir de unas normativas de referencia.

3.4 Normativas de referencia

3.4.1 Normativa concerniente a ensayos de probetas

Las dimensiones teóricas correspondientes a las probetas cúbicas fueron $80 * 80 * 80(mm)$. La velocidad y el tipo de carga fue variando para ajustarnos a los parámetros recomendados. En principio hicimos algunos ensayos con control en fuerza a una velocidad de $5kN/min$.

Este tipo de ensayo tiene un inconveniente, no podemos apreciar el tramo de descarga de la curva Tensión-Deformación. Por lo tanto, decidimos ejecutar los ensayos con control en desplazamiento a una velocidad de $1mm/min$.

Procedimos de igual manera con las probetas prismáticas, de dimensiones nominales $160 * 80 * 80(mm)$. Por su parte, a estas probetas se les aplicó una velocidad de carga de $2mm/min$, al tener una altura la cual era prácticamente el doble que la de los cubos.

Con los cilindros ($h=300\text{ mm}$, $\phi=150mm$) ocurrió exactamente lo mismo. Esta vez, la velocidad fue de $4mm/min$.

Todas las probetas tuvieron un periodo de secado comprendido entre 90 y 110 días.

En total se ensayaron veinticinco probetas cúbicas, dieciséis probetas prismáticas y tres cilíndricas.

La normativa por la que nos hemos regido para determinar tales aspectos y sus requisitos se detallan a continuación, especificando cuáles de ellos han sido cumplidos en nuestro proyecto.

NTE E.080, Perú

✓ Ensayar un mínimo de seis probetas fabricadas con la misma composición que el material a emplear en las pilas y muretes.

✗ Fabricar cubos de 0,1 m de arista para obtener la resistencia a compresión simple.

UNE-EN 772-1

Cabe señalar que esta norma, así como la UNE-EN 1052-1, es aplicable a cualquier ensayo de fábrica de albañilería, no siendo específica para construcciones con tierra cruda.

✓ Ensayar un mínimo de seis probetas.

✓ Fabricar las probetas con caras planas y paralelas y limpiar los platos de la máquina de ensayo.

✓ La duración del ensayo debe ser superior a un minuto.

✓ Para una resistencia $f_k \leq 10kN/mm^2$, la velocidad de carga recomendada es $v \leq 0,05N/(mm^2 * s)$. Con una superficie de contacto de $80 * 80 = 6400mm^2$, $v \leq 320N/s = 19,2kN/min$.

3.4.2 Normativa concerniente a ensayos de pilas

Las pilas estuvieron compuestas por seis hiladas de un bloque y medio cada una, y tuvieron unas dimensiones de $520 * 580 * 16(mm)$. Contamos con juntas de 2 cm de anchura. El tipo de ensayo fue con control en desplazamiento, compuesto por una rampa de velocidad $1mm/min$. El tiempo medio de rotura de las pilas fue 15 minutos.

El tiempo de curado de la primera pila ensayada fue de 45 días, además de los días necesarios para el curado de los bloques, que según el lote al que perteneciesen las unidades tenían una edad u otra.

Los transductores de desplazamiento fueron colocados del modo que se muestra en la figura 3.16. Así, los transductores verticales se colocaron a una distancia $H/3$ de las caras superior e inferior y a una distancia $L/4$ de las caras laterales.

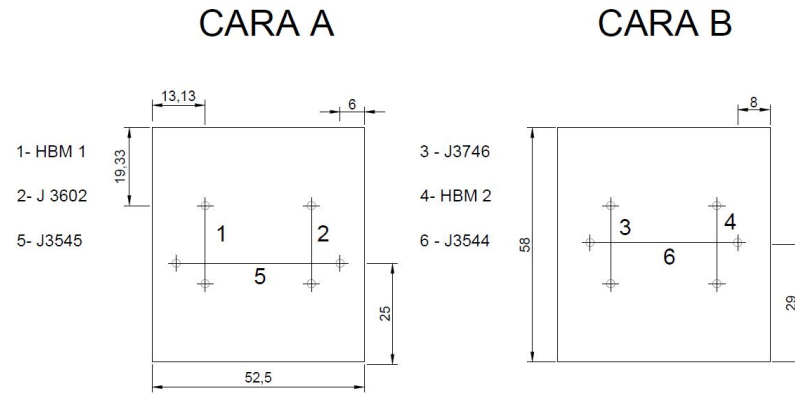


Figura 3.16 Posición de los transductores de desplazamiento en la primera pila.

Las normas aplicables a este tipo de ensayo son las siguientes:

UNE-EN 1052-1

✓ Las dimensiones de la pila y la disposición de los sensores de desplazamiento deben cumplir los requisitos que vemos en las figuras 3.17 y 3.18, respectivamente.

Tamaños de probeta mínimos para ensayar la resistencia a compresión de fábricas de albañilería

Tamaño de la cara vista de la pieza		Tamaño de la probeta de fábrica de albañilería			$h_s=580\text{ mm}$
$l_u\text{ (mm)}$	$h_u\text{ (mm)}$	Longitud l_s	Altura h_s		Espesor t_s
≤ 300	≤ 150	$\geq (2 \times l_u)$	$\geq 5\ h_u$	$\geq 3\ t_s\ y\ \leq 15\ t_s\ y\ \geq l_s$	$\geq t_u$
	> 150		$\geq 3\ h_u$		
> 300	≤ 150	$\geq (1,5 \times l_u)$	$\geq 5\ h_u$		
	> 150		$\geq 3\ h_u$		

$h_u=80\text{ mm}$
 $t_s=520\text{ mm}$
 $l_u=320\text{ mm}$
 $t_u=160\text{ mm}$

$h_s = 580$ mm
 $h_u = 80$ mm
 $l_s = 520$ mm
 $l_u = 320$ mm
 $t_s = 160$ mm

Figura 3.17 Dimensiones establecidas para pilas por la norma UNE-EN 1052-1.

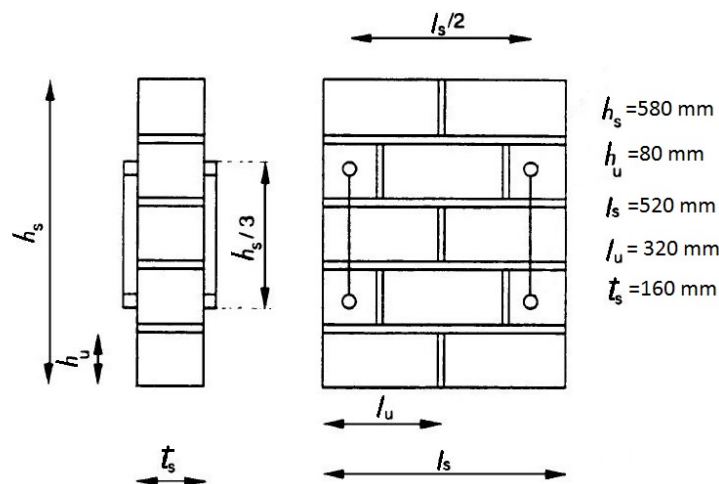


Figura 3.18 Disposición de los sensores de desplazamiento para un ensayo de pilas según la norma UNE-EN 1052-1.

✓ La rotura del espécimen debe ser alcanzada en un tiempo comprendido entre 15 y 30 minutos. Para ello, los valores de la velocidad de carga deben estar entre $0,15 N/(mm^2 \cdot min)$ y $1,25 (mm^2 \cdot min)$.

Contando con una superficie de $520 * 16 = 8320 \text{ mm}^2$, $1,33 \text{ kN/min} \leq v \leq 11,05 \text{ kN/min}$.

NTE E.080, Perú

- ✓ Ensayar un mínimo de tres probetas.
- ✓ El espesor de las juntas debe ser de 2 cm.
- ✓ Las pilas deben de tener un mínimo de cuatro hiladas o filas.
- ✓ El tiempo de curado debe ser mayor a 30 días.
- ✓ El cociente entre la altura y el espesor debe ser aproximadamente 3.

3.4.3 Normativa concerniente a ensayos de muretes

Los muretes estuvieron compuestos por nueve hiladas de dos bloques y medio cada una. Las dimensiones de los muretes fueron $880 * 880 * 160 (\text{mm})$. El tiempo de curado no está determinado aún, puesto que no se han ensayado. El cabezal que se utilizará para someter el muro a la carga, mide 60 mm de ala. La mayor diferencia de longitud entre las aristas principales es de 1,5 cm, debido a las irregularidades del material.

Las normas que abarcan esta tipología de ensayo son:

NNMX-C-464-ONNCCE-2010, Nuevo México

- ✓ La longitud del cabezal de aplicación de la carga no debe superar la longitud de una hilada.

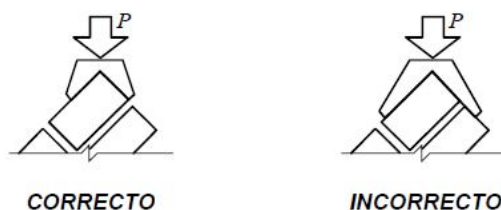


Figura 3.19 Posición de los cabezales de carga para ensayos de compresión oblicua.

- ✓ Los lados del murete deben ser iguales. Si el cociente entre el lado menor y el mayor es menor o igual que 0,9, se debe desechar la probeta.
- ✓ Los muretes se deben almacenar en ambiente de laboratorio por lo menos 28 días.

ASTM E519, Norma Internacional

- ✓ Pese a que la norma establece que los muretes deban tener unas dimensiones de $1200 * 1200 (\text{mm})$, permite ensayar con probetas de menor tamaño, lo cual propiciaría una correlación entre los resultados.
- ✓ La longitud del cabezal de aplicación de la carga debe ser $\leq 1/8$ de la longitud total.
- ✗ La diferencia de tamaño entre las dimensiones principales deben estar dentro de un rango de 6 mm.
- ✓ Se deben ensayar al menos tres especímenes.
- ✓ El tiempo de curado mínimo es de 28 días.

4 Ejecucion de los ensayos

En este apartado nos centraremos en una exposición general de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, los cuales serán analizados detalladamente en el siguiente capítulo.

Los resultados que se expondrán son los concernientes a los ensayos de probetas cúbicas, prismáticas, cilíndricas y pilas.

De la totalidad de probetas prismáticas elaboradas, únicamente tres de ellas fueron instrumentadas con dos sensores de desplazamiento LVDT. Por su parte, las tres probetas cilíndricas fueron también instrumentadas con los propios sensores.

Los ensayos se han clasificado por lotes, el de las unidades preliminares y el de las finales. Se han analizado por separado para observar si existía alguna relación entre las diferentes amasadas. Realmente no ha habido gran disparidad entre ambos lotes, lo que tiene sentido porque el proceso de fabricación fue prácticamente idéntico.

A partir de las gráficas Fuerza-Desplazamiento ($F - \Delta L$), obtenidas directamente de la máquina y de los sensores en los casos correspondientes, se hallaron:

- La curva Tensión-Deformación. Para la obtención de los valores de la tensión(σ) y la deformación(ϵ) de un material, es necesario conocer el área de la probeta que se encuentra sometida a la carga y la longitud sobre la cuál se está midiendo el desplazamiento. Sus expresiones son las siguientes:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- La resistencia a compresión simple (f_{ck})del material. Se define como el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. Por lo tanto, coincide con la máxima tensión a la que se somete la pieza.
- La deformación de pico: Es la que sufre el material en el instante en el que la curva llega a su máximo en tensiones (f_{ck}).
- El modulo de elasticidad. El módulo de elasticidad, o módulo de Young, se define como la pendiente asociada a la curva $\sigma - \epsilon$ en su tramo elástico lineal. Para asegurarnos de tomar una serie de puntos correspondientes a dicho tramo se toman los valores de la gráfica comprendidos entre $1/3f_{ck}$ y $2/3f_{ck}$. Así, obtenemos el módulo de Young como:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L}}$$

Cabe señalar que hay una diferencia bastante significativa en cuanto la deformación de pico (deformación correspondiente a la tensión de rotura) y el módulo de Young adquiridos a partir de la curva facilitada por el desplazamiento de la máquina y la curva correspondiente al desplazamiento de los transductores.

Ello se debe a que el desplazamiento de la máquina empieza a sumar unidades en cuanto se comienza el ensayo, y como el plato actuador no está en pleno contacto con la cara superior de la probeta, se produce un aumento de desplazamiento y no de fuerza, provocando así un tramo horizontal en la curva característica.

Además, el desplazamiento que mide la máquina de ensayos conlleva implícito el desplazamiento que provoca la deformación del pórtico. De esta forma, obtendremos desplazamientos mayores que los reales para una misma fuerza, lo que implica una disminución de la pendiente de la curva F-D, y, consecuentemente $\sigma - \epsilon$, que se traduce en una disminución del módulo de elasticidad.

Debido a tal efecto, se han decidido tarar las gráficas $\sigma - \epsilon$ de las probetas que no se han ensayado con sensores de desplazamiento, deshaciéndonos del tramo horizontal. Se ha conseguido haciendo un cero en los desplazamientos a partir de una carga de 0.35 kN. Este método no es exacto pero es más acorde con la realidad para la obtención de los valores de la deformación de pico y del módulo de elasticidad, pues no contemplamos el acoplamiento del plato de carga sobre la cara superior de la probeta.

En el presente apartado se mostrarán, también, gráficos comparativos entre las curvas obtenidas a través de los transductores y las obtenidas a partir de la máquina hidráulica, para un mismo ensayo.

4.1 Descripción de la maquinaria empleada

4.1.1 Máquina universal de ensayos marca servosis

La máquina utilizada para los ensayos de probetas cilíndricas, cúbicas y prismáticas ha sido la máquina universal de ensayos de la marca servosis. Cuenta con una célula de carga de la misma marca con capacidad de carga de 5 toneladas y un recorrido de 200 mm de carrera.

Su eje inferior es fijo, mientras que el superior es móvil y es el que aplica la carga en el centro de la probeta, ambos ejes cuentan con la adaptación de un plato para conseguir un reparto uniforme de la carga. El eje superior tiene que aproximarse hasta que contacte con la probeta antes de comenzar el ensayo, para que el tramo asociado al acoplamiento del plato sobre la probeta sea lo menor posible.

La máquina va conectada a un ordenador desde el que se controlan los parámetros que se quieren medir y la manera de realizar el ensayo (ensayo con control en carga o ensayo con control en desplazamiento). En el ordenador se van metiendo por fases los parámetros de la velocidad y el destino.

El software informático que trata y almacena la señal que recibe de los diferentes canales de medida es también de la marca servosis, se denomina PCD 2k. Cuenta con una serie de funciones que nos facilitan la ejecución del ensayo. En la configuración del trazador es posible configurar el número de puntos que se van a tomar en cada ensayo. Para poder trabajar de manera más cómoda con las tablas de los resultados obtenidos, se toma un número de puntos no muy elevado, de 5 puntos por segundo.

Con la ventana de control es posible aproximar el apoyo superior antes de comenzar el ensayo. La ventana de alarmas se puede configurar para que no se sobrepasen una serie de limitaciones previamente establecidas. El apoyo superior se aproxima todo lo posible, sin que la probeta comience a percibir la carga. Una vez realizado ésto, el ensayo ya está preparado para comenzar.



Figura 4.1 Máquina universal de ensayos servosis.

4.1.2 Pórtico de carga marca servosis

La máquina utilizada para los ensayos de pilas es un pórtico de carga de la marca servosis, con una célula de carga de capacidad 20 toneladas y un recorrido de 300 mm de carrera.

Únicamente cuenta con un eje móvil, el superior, al que se le ha acoplado un perfil de reparto en forma de H. Como superficie inferior se ha utilizado otro perfil en H. El perfil inferior se colocó en el suelo, habiendo tenido que ajustarse su posición para hacer coincidir los dos centros de gravedad, ya que se requería la menor excentricidad de carga posible.

El procedimiento de toma de datos es el mismo que el que utiliza la máquina universal. No obstante, como se requería la entrada de seis canales más de medida (LVDT), hubo que recurrir a un dispositivo de adquisición de datos (DAQ) de la marca national instruments. Este dispositivo recogía todos los canales y mandaba la información, mediante una entrada USB, a un ordenador. Dicho ordenador, a través del software LABview, también de national instruments, se encargaba de transformar los datos de entrada de voltaje en desplazamientos.



Figura 4.2 Pórtico de carga marca servosis.

4.2 Resultados de los ensayos

4.2.1 Ensayos de probetas cúbicas

Las probetas cúbicas no tienen una dimensión fija, así que se fueron tomando medidas de las tres dimensiones de cada unidad, para poder hallar las tensiones y deformaciones correspondientes a cada ensayo en particular. Las medidas se tomaron con el mismo calibre electrónico con el que se calibraron los sensores.

También se anotó la edad (en días) de cada probeta ensayada, para buscar alguna posible correlación entre este dato y la resistencia a compresión.



Figura 4.3 Ensayo de probeta cúbica.

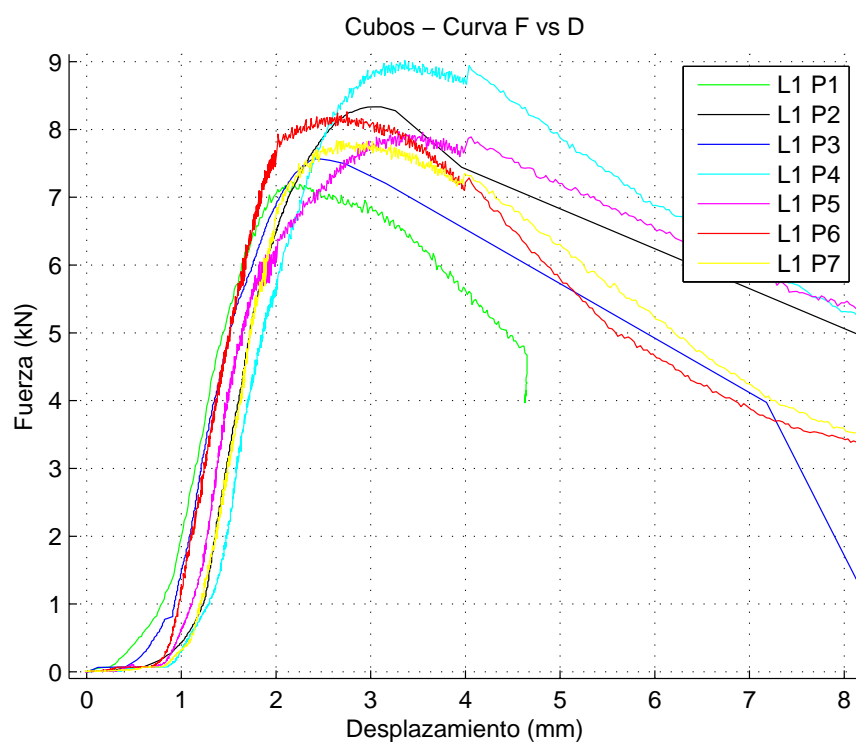
Sólo expondremos las curvas Fuerza-Desplazamiento en una ocasión, para mostrar el error que se produce en el primer tramo de la muestra de datos. Las curvas que nos interesan son las de Tensión-Deformación, pues son representativas del material y no de una probeta. Como podemos apreciar, las curvas $\sigma - \epsilon$, no parten del cero en tensiones debido a la tara que se ha efectuado.

Tabla 4.1 Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas cúbicas del lote 1.

UNIDAD	EDAD(días)	LOTE	t(mm)	w(mm)	h(mm)	Control (F o D)
L1-1	90	1	70	85	75	D
L1-2	90	1	75	80	80	F
L1-3	90	1	78	79	80	F
L1-4	98	1	78	78	83	D
L1-5	98	1	79	84	78	D
L1-6	98	1	80	81	78	D
L1-7	98	1	82	84	78	D

Tabla 4.2 Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas cúbicas del lote 2.

UNIDAD	EDAD(días)	LOTE	t(mm)	w(mm)	h(mm)	Control (F o D)
L2-1	90	2	77	77	77	F
L2-2	90	2	77	79	78	D
L2-3	98	2	81	78	78	D
L2-4	98	2	78	81	78,5	D
L2-5	98	2	78	81,5	78	D
L2-6	98	2	79	81	79	D
L2-7	105	2	78	77,5	78,2	D
L2-8	105	2	77,5	72,5	78	D
L2-9	105	2	78	76,5	78	D
L2-10	105	2	86	96	83	D
L2-11	105	2	84	99	88,5	D
L2-12	105	2	101	90	91,5	D
L2-13	105	2	100	88	91	D
L2-14	105	2	87	101	86	D
L2-15	105	2	90	101	91	D
L2-16	105	2	90	101,5	85	D
L2-17	105	2	90	99	99	D
L2-18	105	2	77,9	75,3	79,1	D

**Figura 4.4** Curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas cúbicas del lote 1.

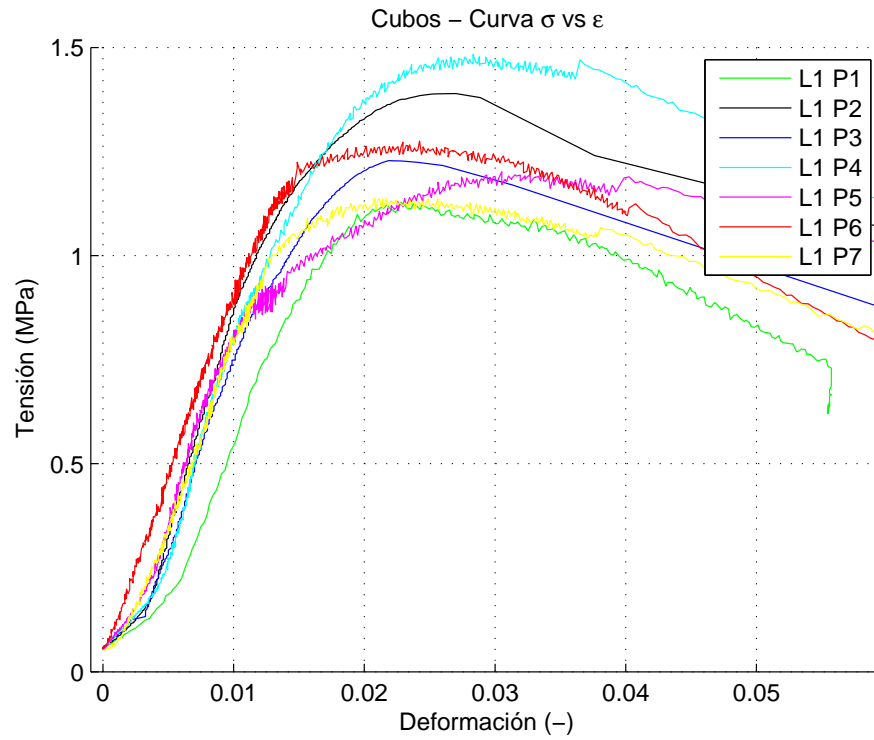


Figura 4.5 Curvas Tensión-deformación de las probetas cúbicas del lote 1.

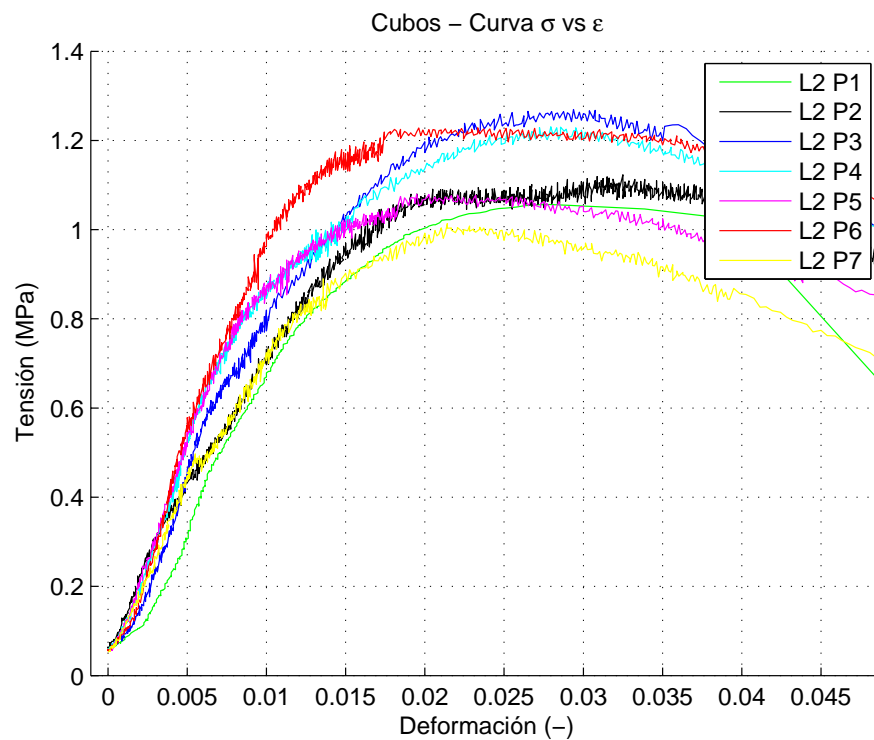


Figura 4.6 Curvas Tensión-deformación de las 7 primeras probetas cúbicas del lote 2.

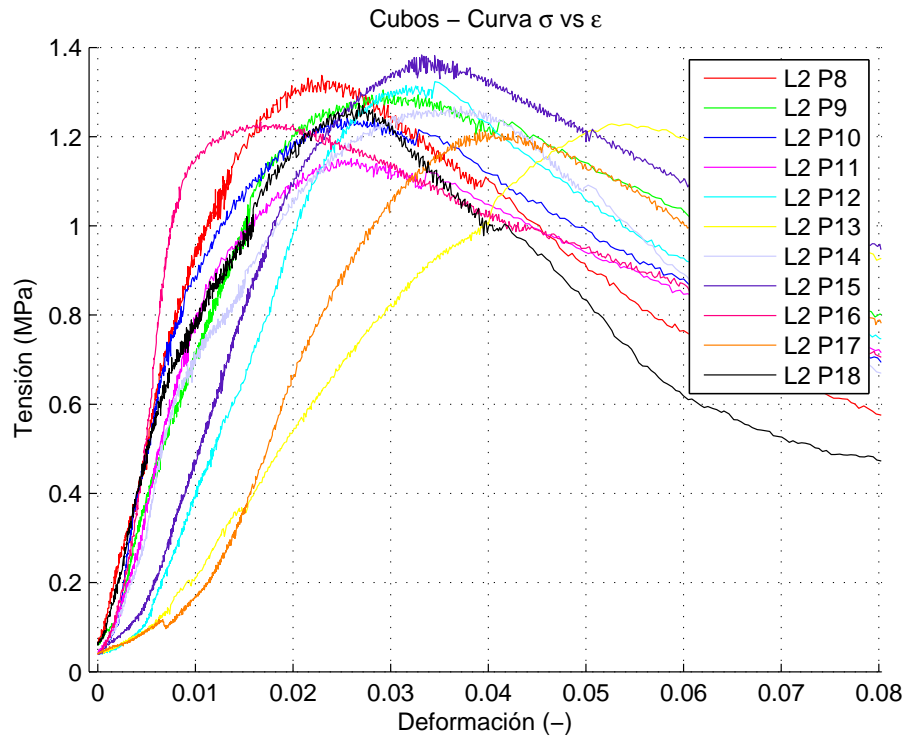


Figura 4.7 Curvas Tensión-deformación de las probetas cúbicas (8 al 13) del lote 2.

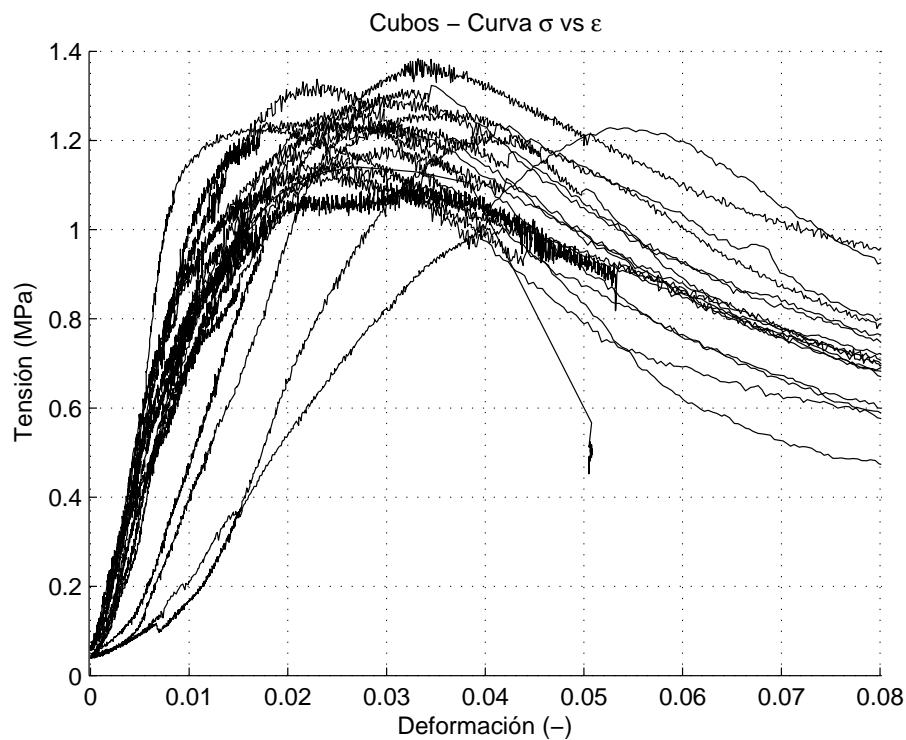


Figura 4.8 Curvas que muestran la dispersión en los ensayos de las probetas cúbicas del lote 2.

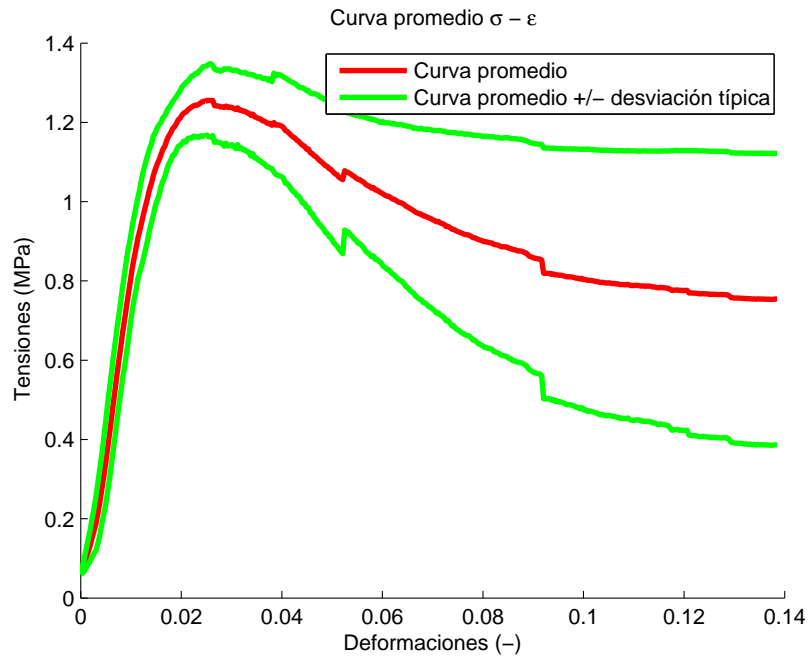


Figura 4.9 Curva promedio de las probetas cúbicas del lote 1 \pm variación típica.

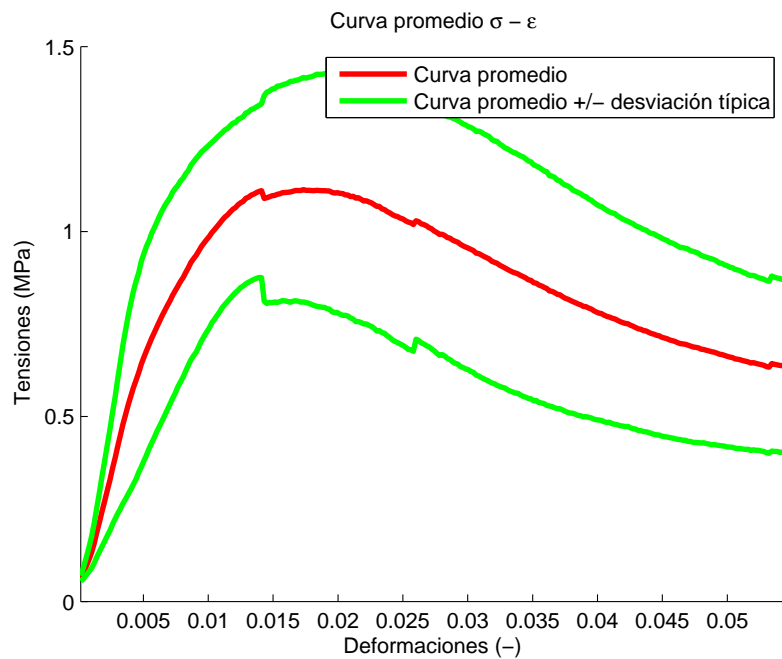


Figura 4.10 Curva promedio de las probetas cúbicas del lote 2 \pm variación típica, sin la ponderación de las probetas 13 y 16.

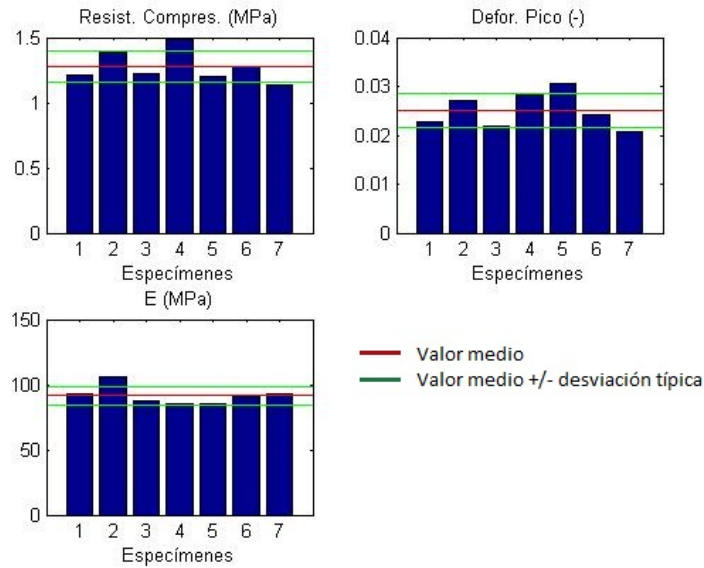


Figura 4.11 Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas cúbicas del lote 1.

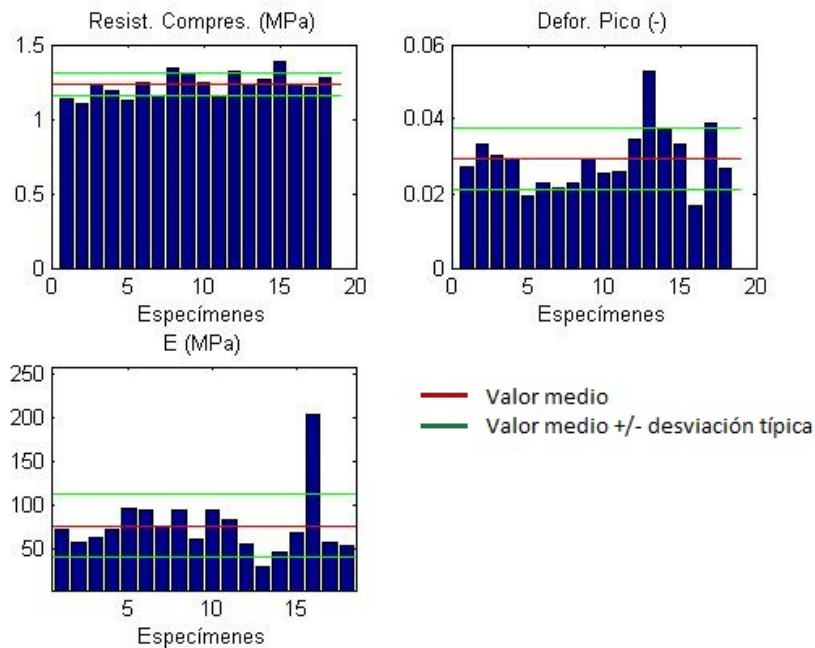


Figura 4.12 Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas cúbicas del lote 2.

La mayoría de los ensayos expuestos se hicieron con control en desplazamiento siguiendo tres rampas de carga:

- 1ª rampa: $1\text{mm}/\text{min}$ hasta 2 mm.
- 2ª rampa: $3\text{mm}/\text{min}$ hasta 4 mm.
- 3ª rampa: $10\text{mm}/\text{min}$ hasta la asíntota horizontal de la curva o el desplome de la probeta.

La creación de estas fases se realiza para ahorrar tiempo en el ensayo. El aumento grande de velocidad de la carga se realiza en el tramo de descarga para que no afecte a la resistencia del material.

Sin embargo, hay algunos ensayos que se hicieron con control en fuerza, a una velocidad de $5kN/min$. Este tipo de ensayo no permite evaluar el tramo de descarga de la curva, pues va buscando un incremento en la fuerza. Además, el ensayo es más rápido y continuo, por lo que la resistencia que se obtiene del mismo es, generalmente, mayor.

Se anotaron algunos ensayos que no fueron del todo satisfactorios. Hubo dos de ellos en los que no se bloqueó el actuador de la máquina, por lo que los desplazamientos que tomó no fueron correctos. Tales ensayos fueron los correspondientes a las probetas número 13 y número 16 del lote 2, de modo que las eliminamos del gráfico de barras comparativo.

De este modo, el diagrama que representa las propiedades quedó como vemos en la figura 4.13, con una dispersión de los datos mucho menor.

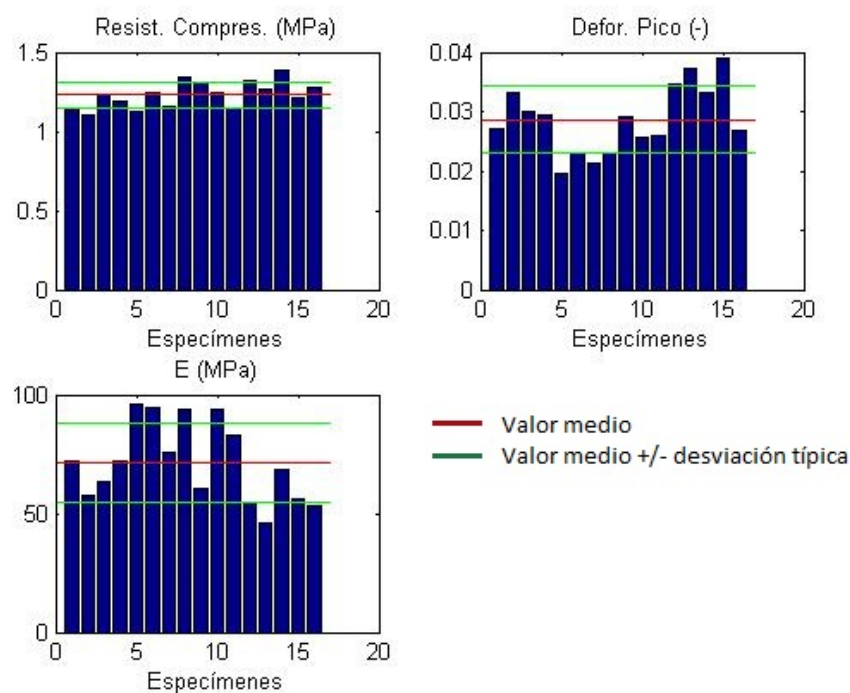


Figura 4.13 Propiedades de las probetas estándar del lote 2.

4.2.2 Ensayos de probetas prismáticas

Siguiendo las pautas del apartado anterior, se tomaron las dimensiones de cada probeta, así como su edad y el tipo de ensayo al que iba a ser sometida. De cada bloque individual de adobe se obtuvieron, mediante el corte, dos probetas prismáticas y otras dos cúbicas.

El ensayo estándar para las probetas prismáticas fue el siguiente:

- 1ª rampa: $2\text{mm}/\text{min}$ hasta 5 mm.
- 2ª rampa: $5\text{mm}/\text{min}$ hasta 10 mm.
- 3ª rampa: $10\text{mm}/\text{min}$ hasta la asíntota horizontal de la curva o el desplome de la probeta.

La probeta número 1 del lote 1 fue ensayada con control en fuerza a una velocidad de 5 kN/min. Por su parte, la probeta número 3 del segundo lote, tenía un área eficaz disminuída debido al desplome de una parte sólida de su superficie, como podemos apreciar en la figura 4.14, por lo que su resistencia se redujo notablemente. Es por ello que ambas probetas se han eliminado de la comparación final de propiedades.

Tabla 4.3 Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas prismáticas del lote 1.

UNIDAD	EDAD(días)	LOTE	t(mm)	w(mm)	h(mm)	Control (F o D)
L1-1	90	1	76	84	150	F
L1-2	90	1	76	84	150	F
L1-3	90	1	76	84	150	D
L1-4	90	1	76	84	150	D
L1-5	90	1	76	84	150	D
L1-6	90	1	76	84	150	D

Tabla 4.4 Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas prismáticas del lote 2.

UNIDAD	EDAD(días)	LOTE	t(mm)	w(mm)	h(mm)	Control (F o D)
L2-1	90	2	80	78	148	D
L2-2	90	2	75	79	150	D
L2-3	92	2	81	78	157	D
L2-4	96	2	79	83	156	D
L2-5	96	2	78	82	160	D
L2-6	96	2	78	81	159	D
L2-7	96	2	78	82	149	D



Figura 4.14 Imperfección en la cara inferior de una probeta prismática.

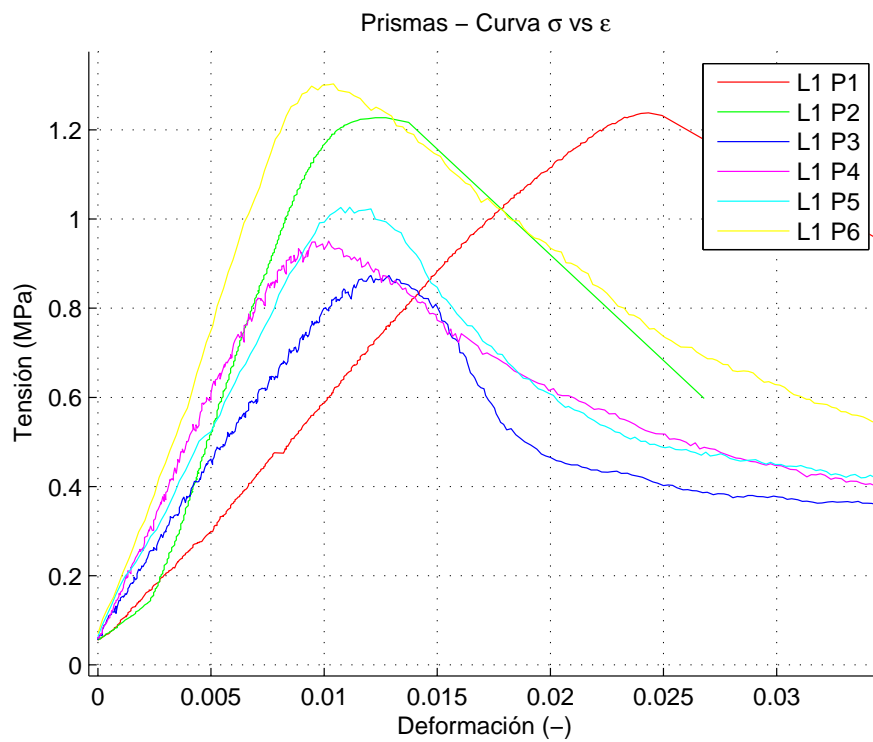


Figura 4.15 Curvas Tensión-deformación de las probetas prismáticas del lote 1.

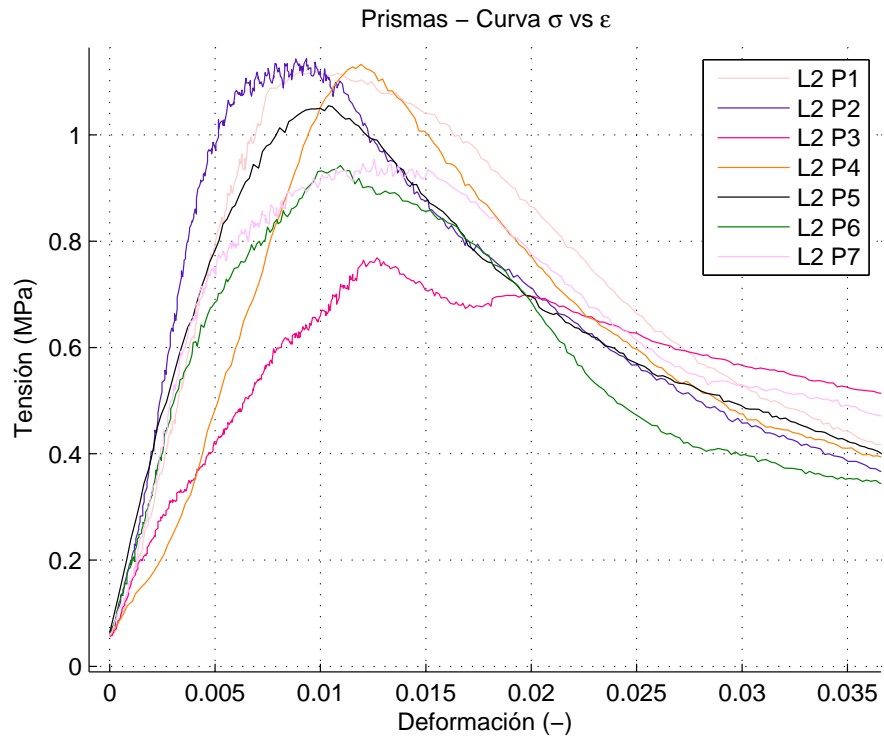


Figura 4.16 Curvas Tensión-deformación de las probetas prismáticas del lote 2.

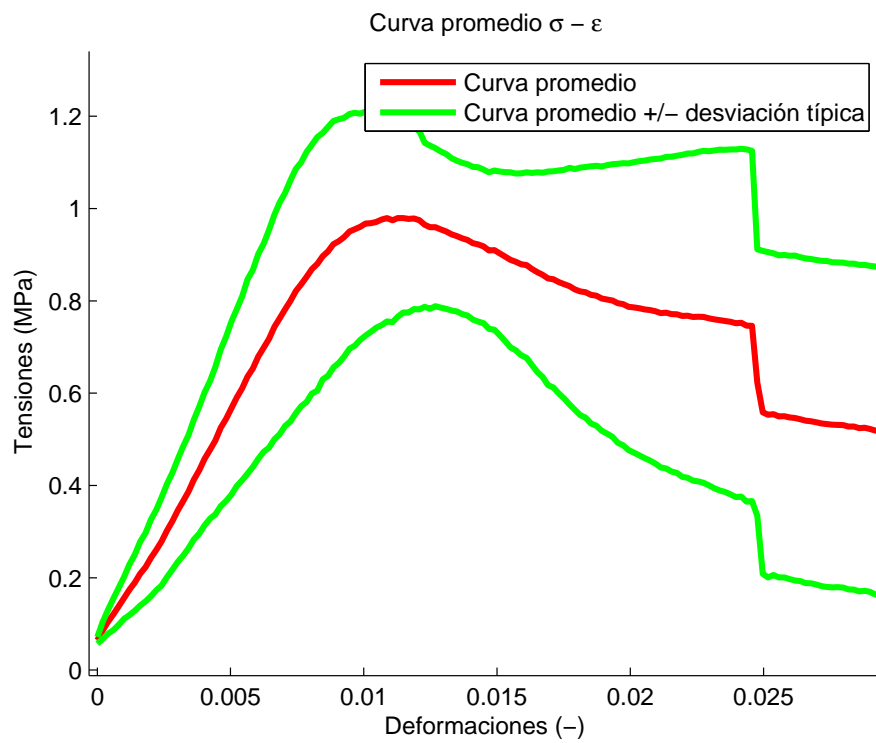


Figura 4.17 Curva promedio de las probetas prismáticas del lote 1 +/- variación típica.

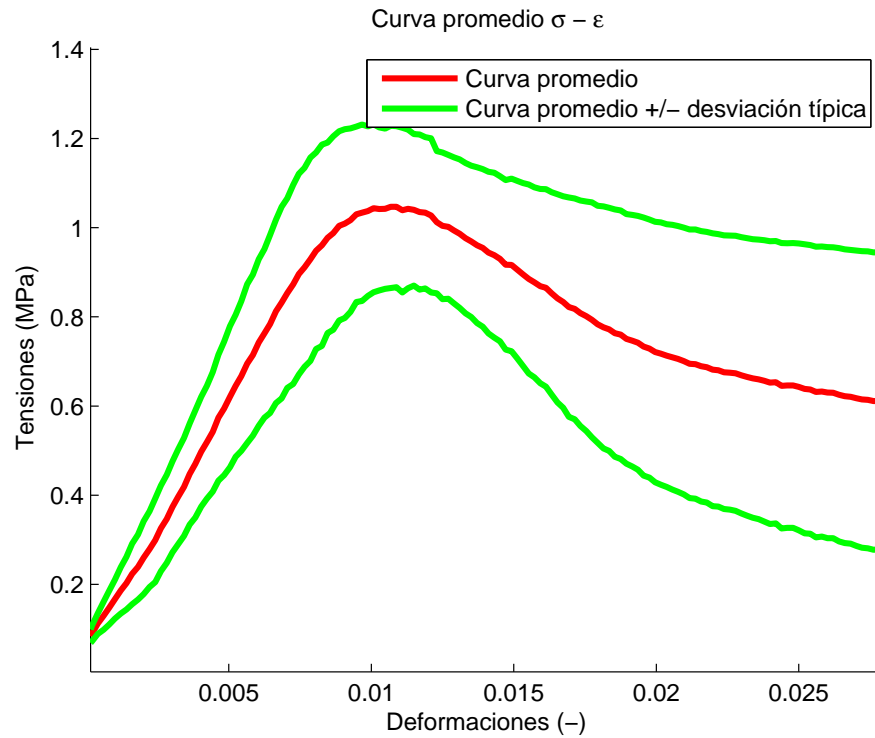


Figura 4.18 Curva promedio de las probetas prismáticas del lote 1 \pm variación típica, sin la ponderación de la probeta 1.

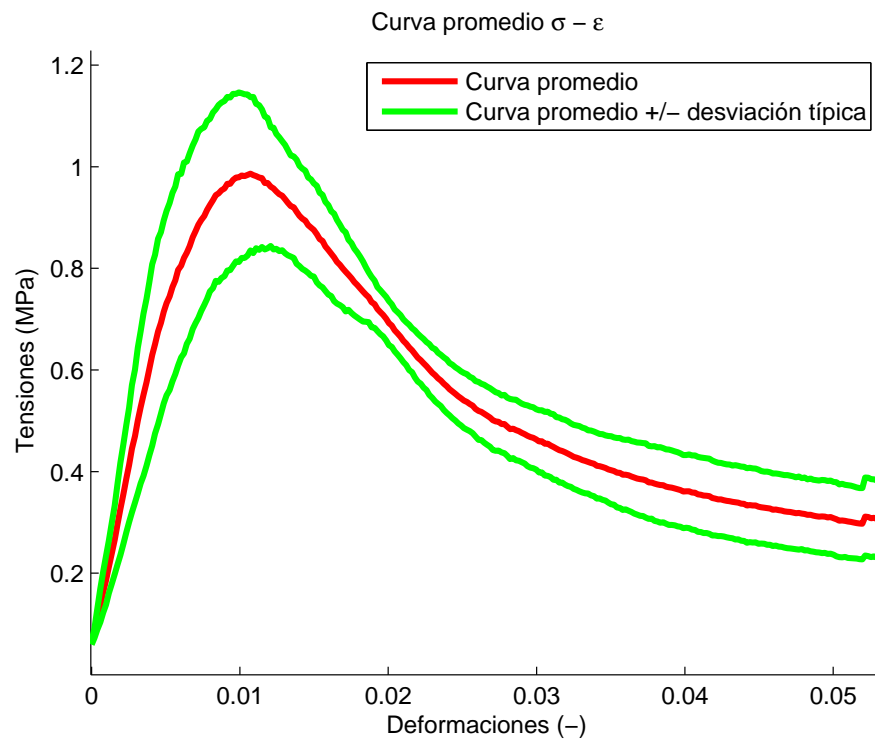


Figura 4.19 Curva promedio de las probetas prismáticas del lote 2 \pm variación típica.

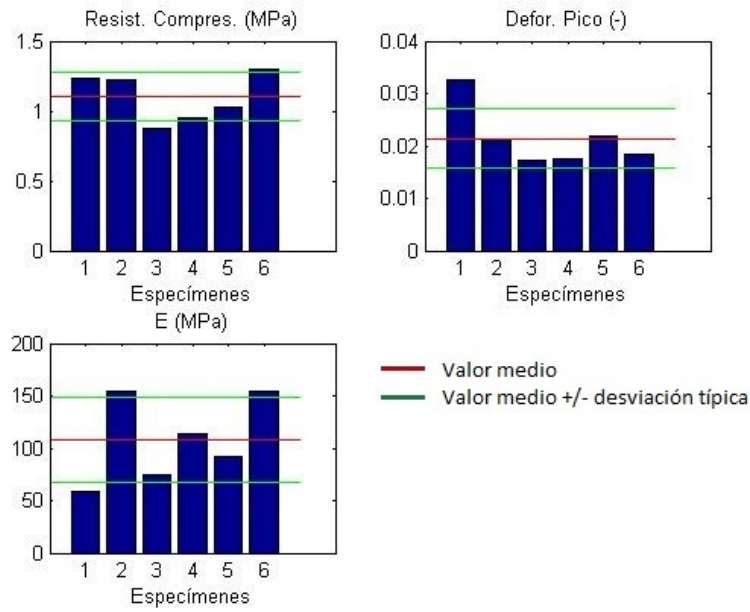


Figura 4.20 Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas del lote 1.

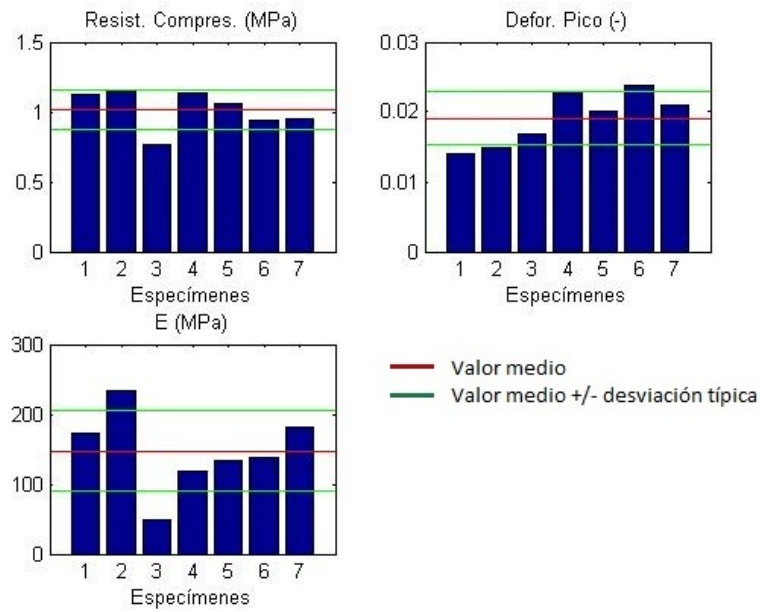


Figura 4.21 Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas del lote 2.

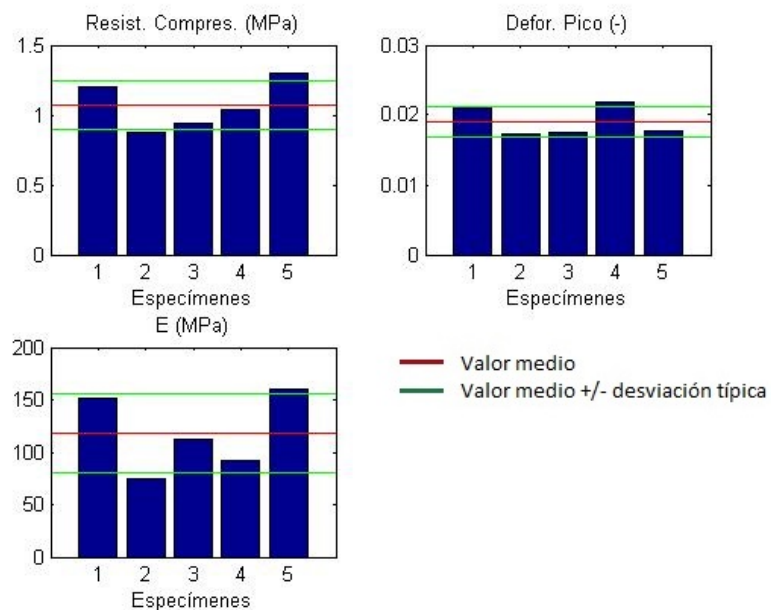


Figura 4.22 Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas estándar del lote 1, sin la ponderación de la probeta número 1.

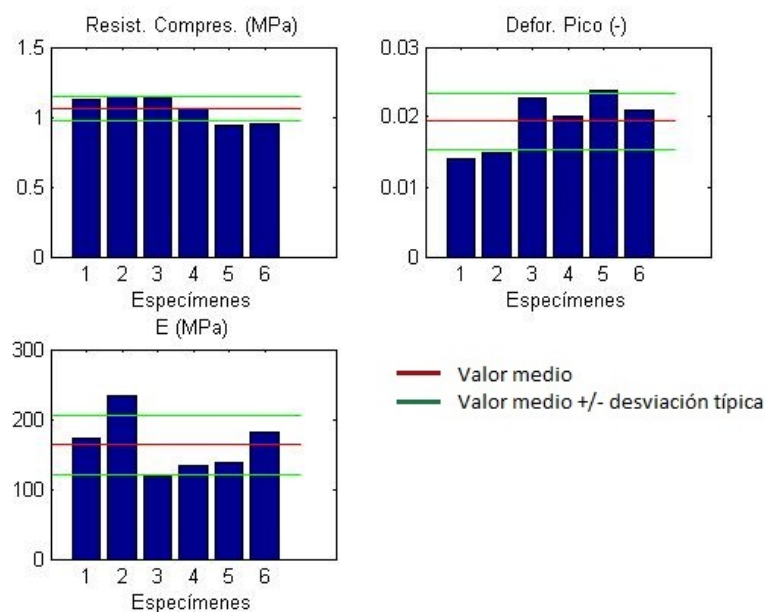


Figura 4.23 Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas estándar del lote 2, sin la ponderación de la probeta número 3.

4.2.3 Probetas prismáticas instrumentadas con LVDT

En esta sección se mostrarán los resultados de las probetas instrumentadas.

A pesar de que se ensayaron tres probetas de este tipo, sólo se expondrán los resultados de las probetas 9 y 10 del segundo lote, pues el primero de los ensayos no resultó satisfactorio al haberse producido un error de medición en los sensores.

Con este apartado queremos señalar la disparidad que existe entre los resultados facilitados por la máquina de ensayos y los transductores de desplazamiento. Se compararán las gráficas, así como el módulo de elasticidad y la deformación de rotura de las curvas taradas.



Figura 4.24 Disposición de uno de los dos sensores de desplazamiento en una probeta prismática.

Tabla 4.5 Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas prismáticas instrumentadas con LVDT del lote 2.

UNIDAD	EDAD(días)	LOTE	t(mm)	w(mm)	h(mm)	Control (F o D)
L2-8	110	2	79	78	155	D
L2-9(P1)	110	2	77	82	158	D
L2-10(P2)	110	2	77	77	159	D

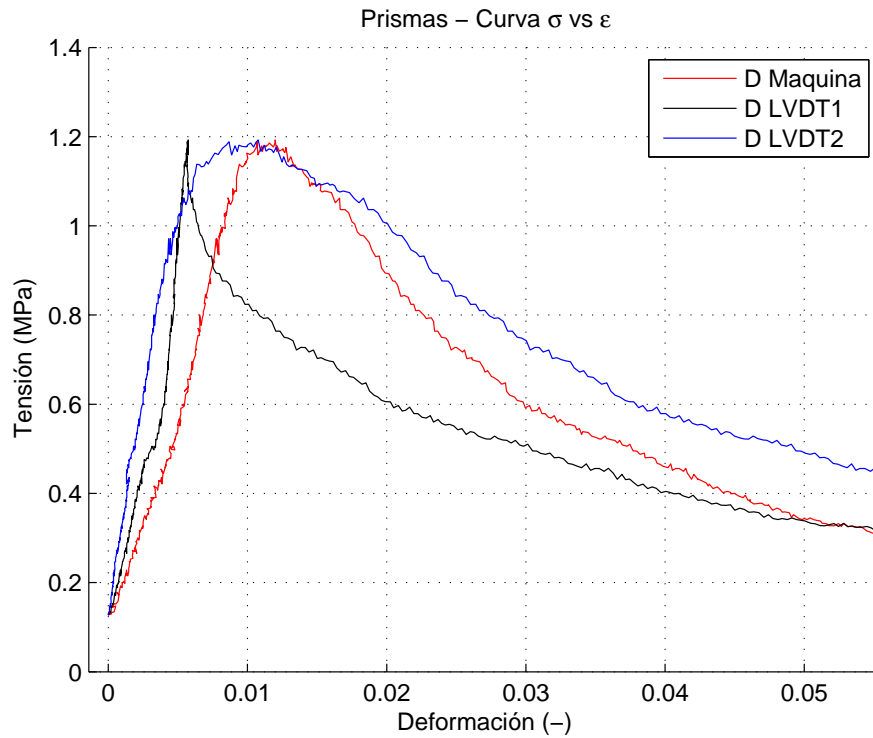


Figura 4.25 Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT con la máquina de ensayos de la probeta prismática 9.

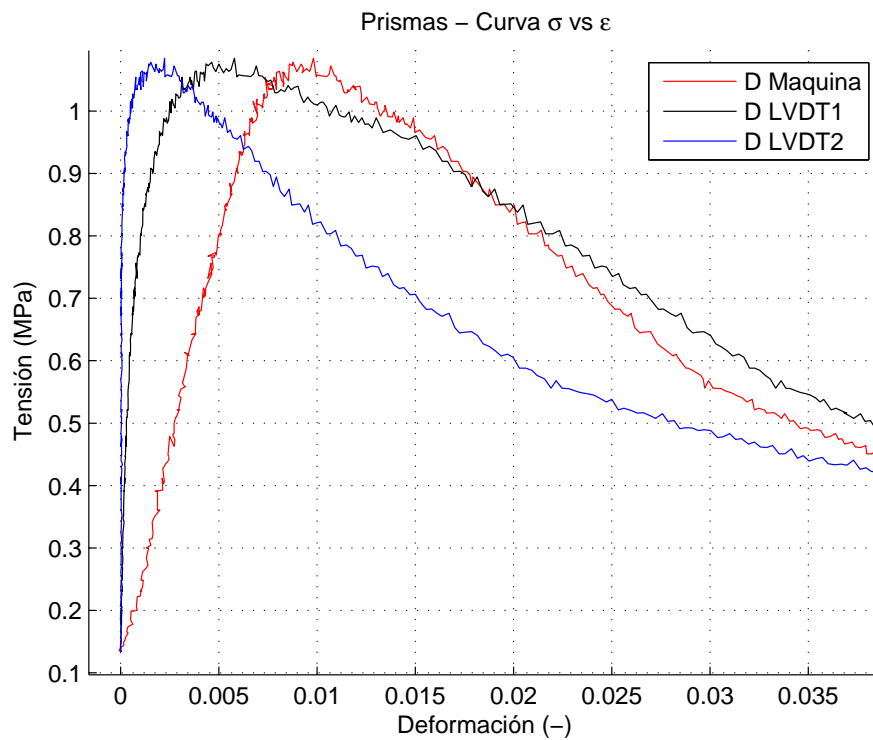


Figura 4.26 Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT con la máquina de ensayos de la probeta prismática 10.

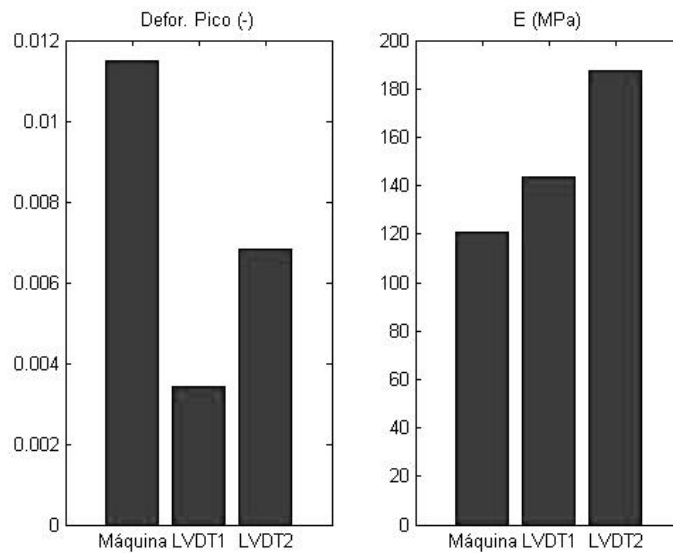


Figura 4.27 Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta prismática 9).

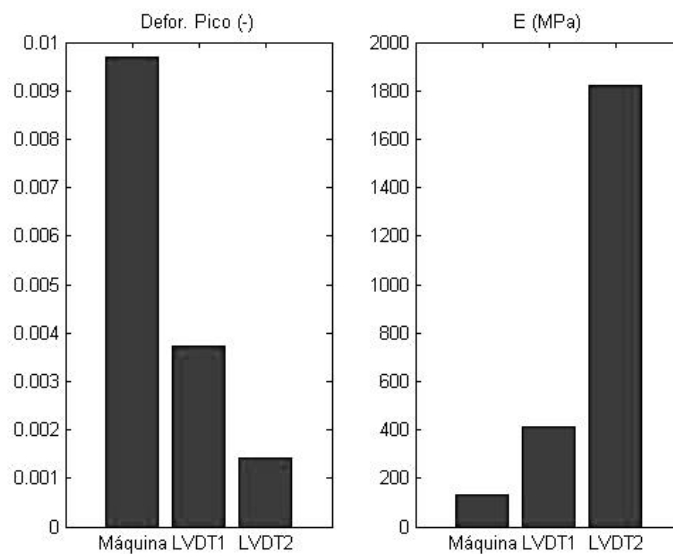


Figura 4.28 Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta prismática 10).

4.2.4 Ensayos de probetas cilíndricas

Un total de tres probetas cilíndricas fueron ensayadas a compresión simple, todas ellas instrumentadas con dos LVDT.

Las probetas cilíndricas se fabricaron en encofrados y pasó un tiempo aproximado de una semana hasta que se produjo al desencofrado, así que contaron con una semana menos de secado. Además, las superficies de la cara inferior y superior quedaron irregulares, por lo que se tuvo que proceder a ejecutar un corte con la máquina radial para que quedasen paralelas. Ello provocó que las probetas no tengan alturas iguales, difiriendo hasta en tres centímetros.

Los cilindros se ensayaron con dos neoprenos en sus dos caras para evitar una mala distribución de la carga.



Figura 4.29 Disposición de los sensores de desplazamiento en una probeta cilíndrica.

Tabla 4.6 Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas cilíndricas instrumentadas con LVDT del lote 2.

UNIDAD	EDAD(días)	LOTE	ϕ (mm)	h(mm)	Control (F o D)
L2-1	110	2	146	263	D
L2-2	110	2	146	274	D
L2-3	110	2	146	240	D

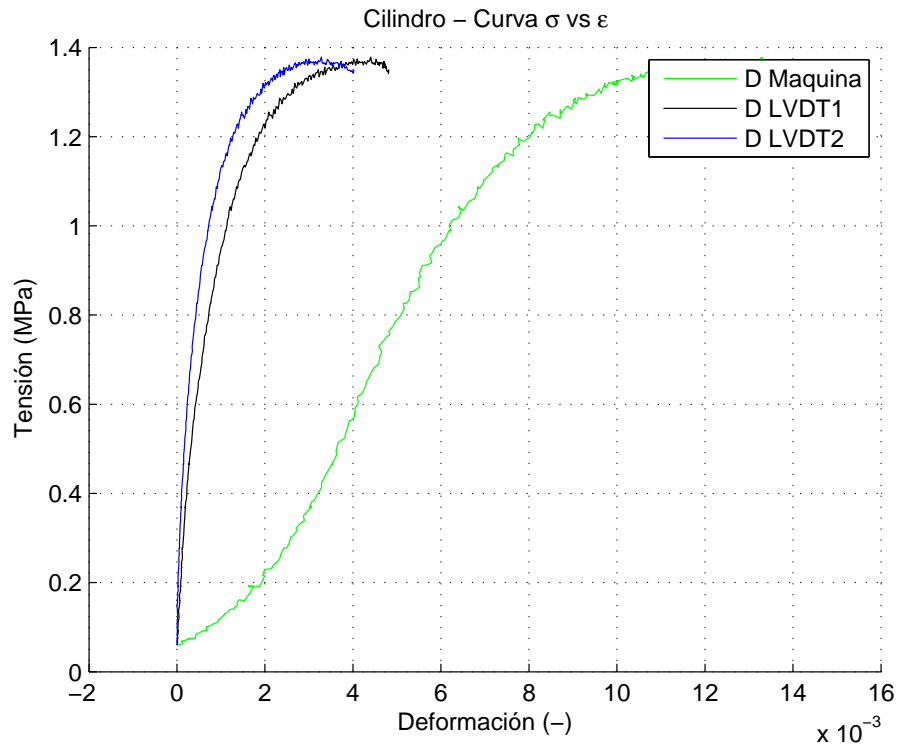


Figura 4.30 Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT frente a la máquina de ensayos de la probeta cilíndrica 1.

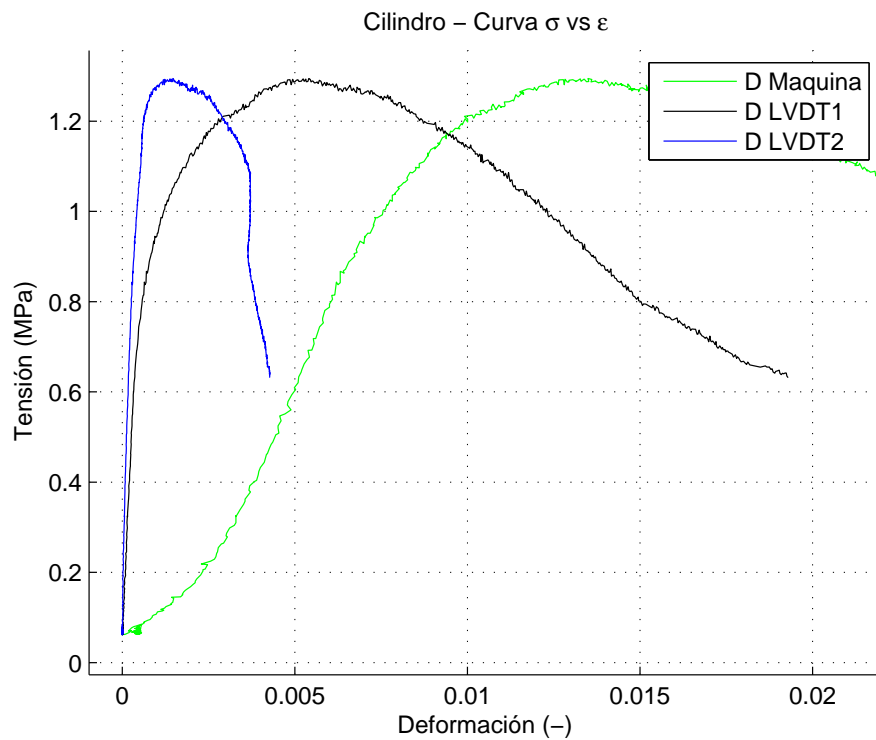


Figura 4.31 Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT frente a la máquina de ensayos de la probeta cilíndrica 2.

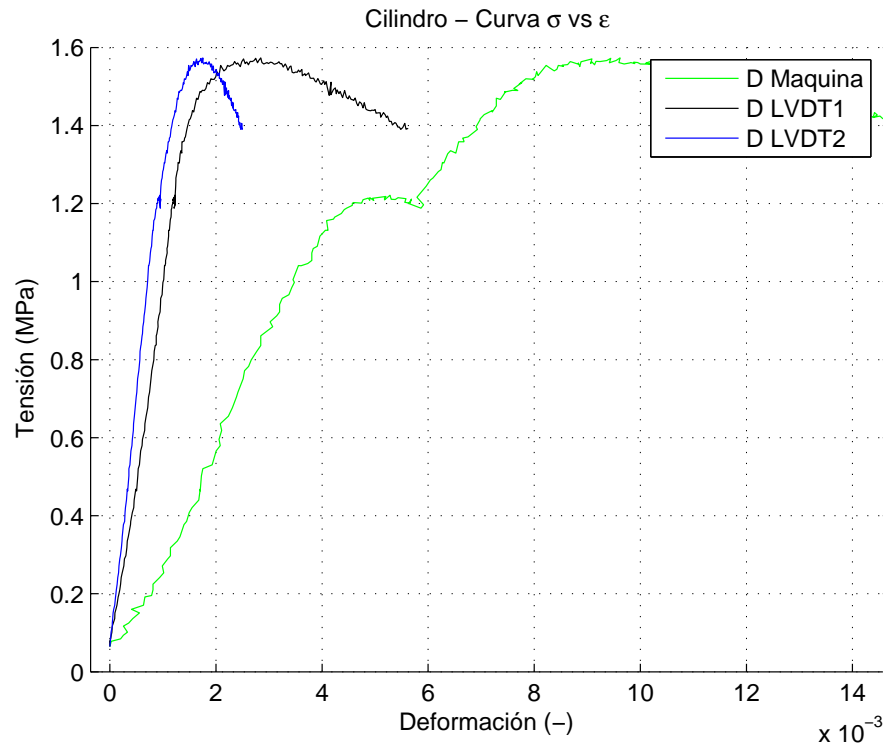


Figura 4.32 Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT frente a la máquina de ensayos de la probeta cilíndrica 3.

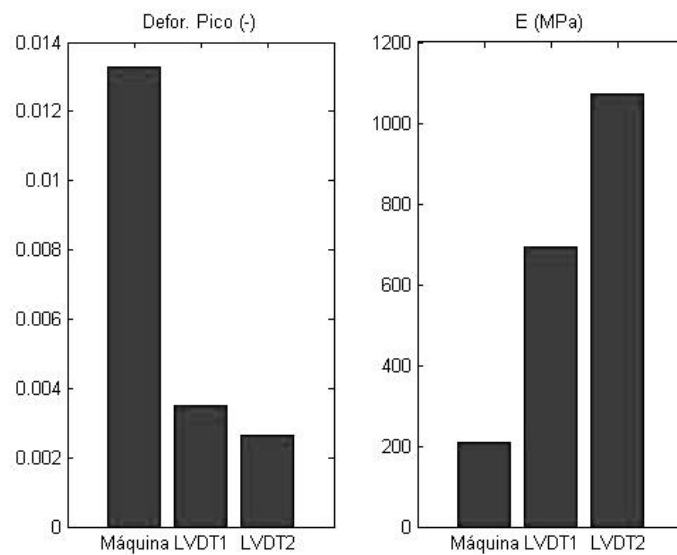


Figura 4.33 Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta cilíndrica 1).

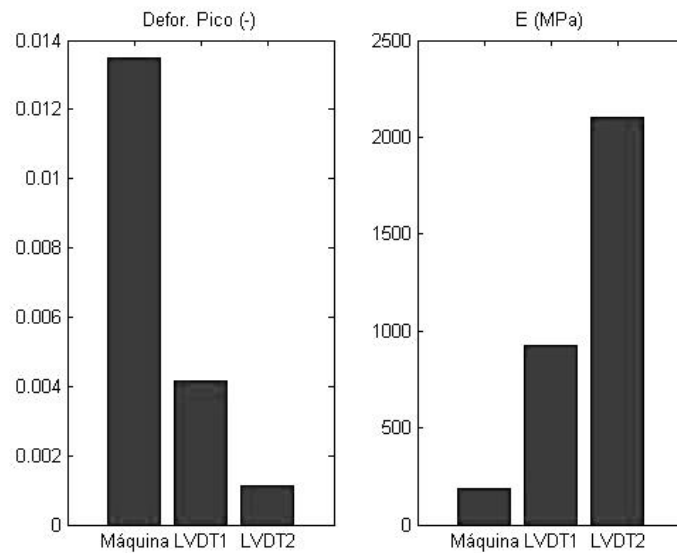


Figura 4.34 Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta cilíndrica 2).

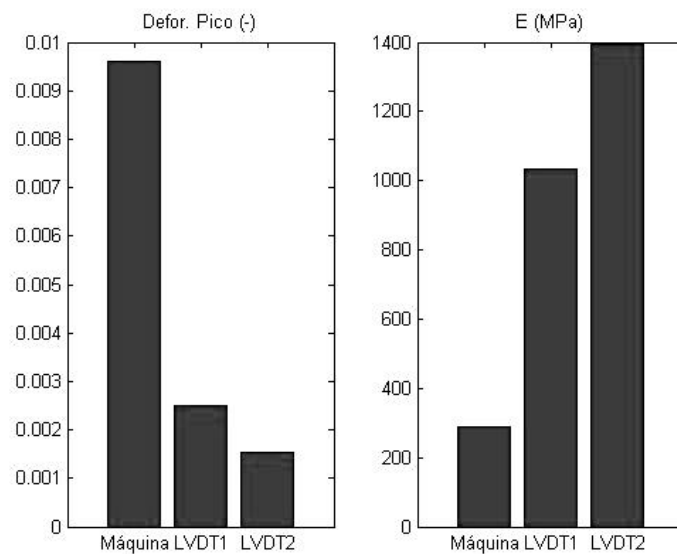


Figura 4.35 Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta cilíndrica 3).

4.2.5 Ensayos de pilas

Los ensayos de pilas se ejecutaron con seis sensores de desplazamiento por cada espécimen, tres en cada cara. De esos tres sensores, dos se colocaron en posición vertical y uno en posición horizontal.



Figura 4.36 Ejecución de un ensayo de pila.

Para llevar a cabo estos ensayos tuvimos varias dificultades. Una de ellas fue la flexión que se producía en la pieza si la carga actuante era excéntrica. De hecho, en alguno de los ensayos, como en el segundo del lote 1 o en el cuarto del lote 2, se apreciaba como las curvas de los sensores verticales van paralelas dos a dos, produciéndose en una de las caras una deformación mucho mayor que en la otra.

El primer ensayo que se realizó es poco representativo, pues durante el mismo se descargó el pórtico varias veces. Una de las razones fue precisamente el ajuste de la viga aplicadora de la carga para que no produjese excentricidad. Esta descarga fue necesaria realizarla en varias de las pilas, pero a niveles de carga menores, por lo que se pudo reiniciar el ensayo.

Tabla 4.7 Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las pilas instrumentadas con LVDT .

UNIDAD	EDAD(días)	LOTE	t(mm)	w(mm)	h(mm)	Control (F o D)
L1-1	45	1	525	170	580	D
L1-2	52	1	510	170	580	D
L2-1	90	2	535	172	580	D
L2-2	97	2	525	170	595	D
L2-3	100	2	530	175	610	D
L2-4	108	2	525	170	595	D

Puesto que en el presente proyecto no se procederá a la obtención del módulo de Poisson, o módulo de elasticidad transversal, no se estudiarán las gráficas que exponen los desplazamientos transversales de los sensores. Lo citado corresponderá a futuros estudios de la Universidad sobre el adobe. Se mostrará una de las gráficas Tensión-Deformación transversal, pero no se pasará a su análisis.

Para la obtención de la deformación asociada a cada transductor, hubo que medir la distancia entre puntos fijos entre los que se encontraba el sensor.

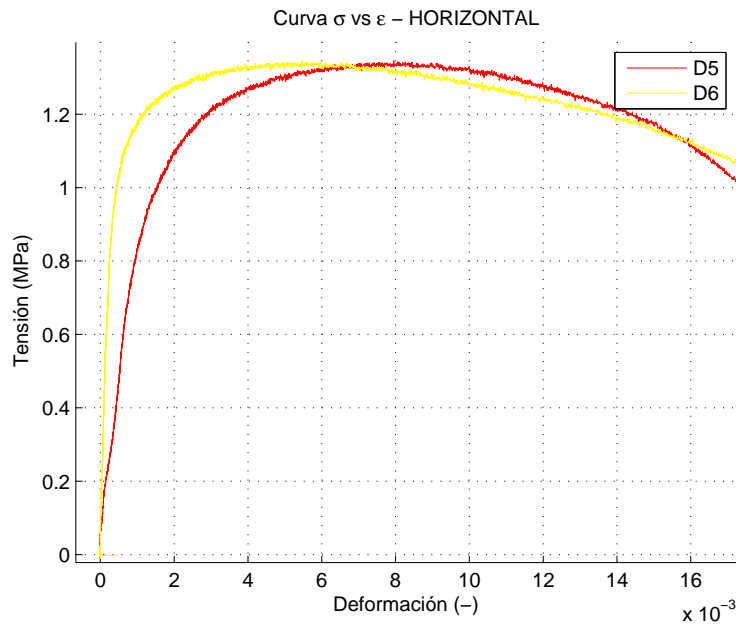


Figura 4.37 Curvas Tensión-Deformación transversal de la pila número 3.

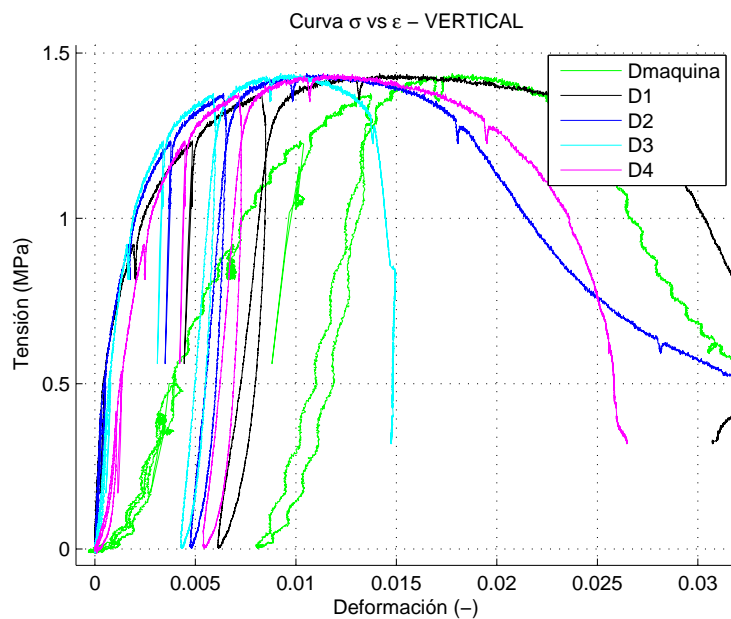


Figura 4.38 Curvas Tensión-Deformación de la pila número 1.

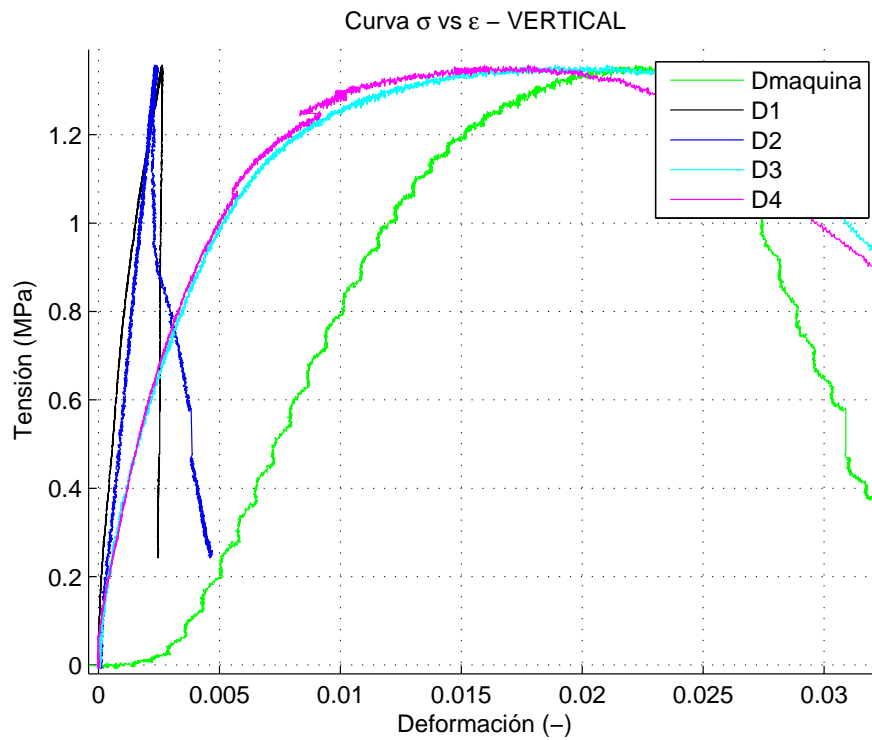


Figura 4.39 Curvas Tensión-Deformación de la pila número 2.

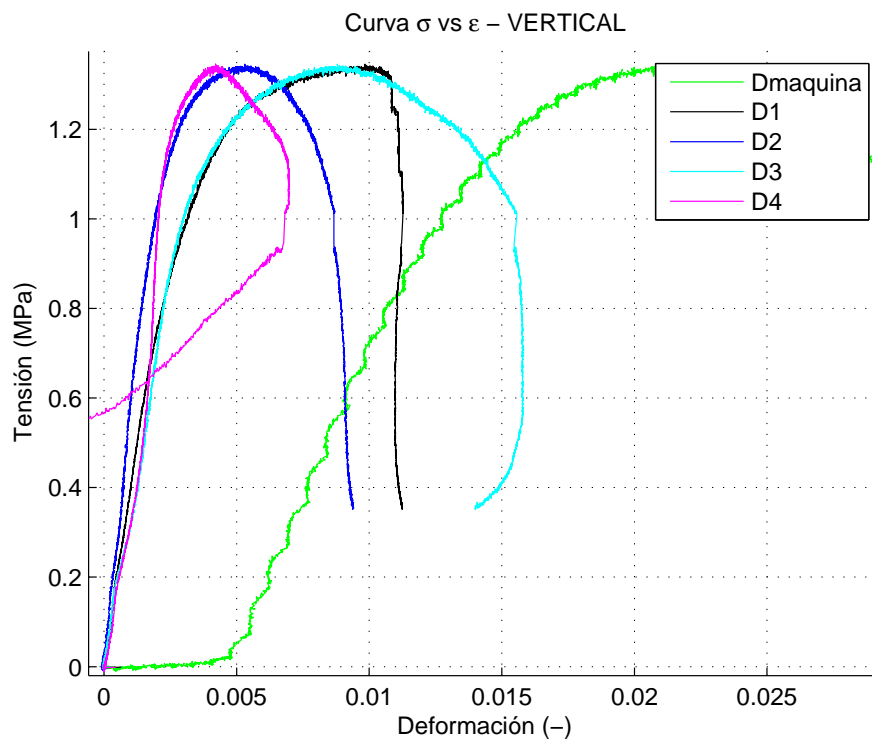


Figura 4.40 Curvas Tensión-Deformación de la pila número 3.

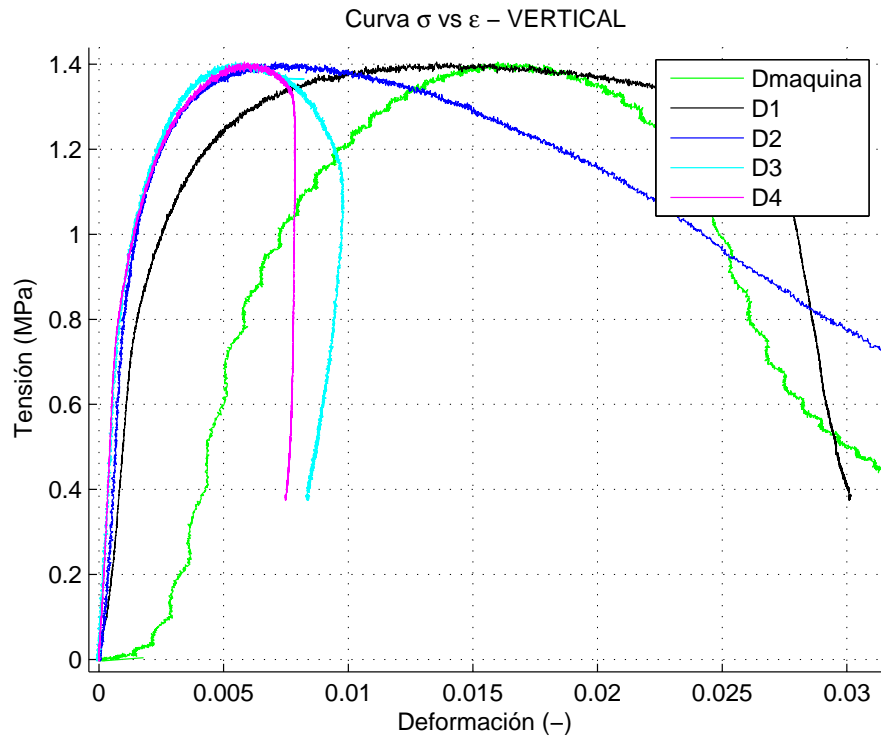


Figura 4.41 Curvas Tensión-Deformación de la pila número 4 .

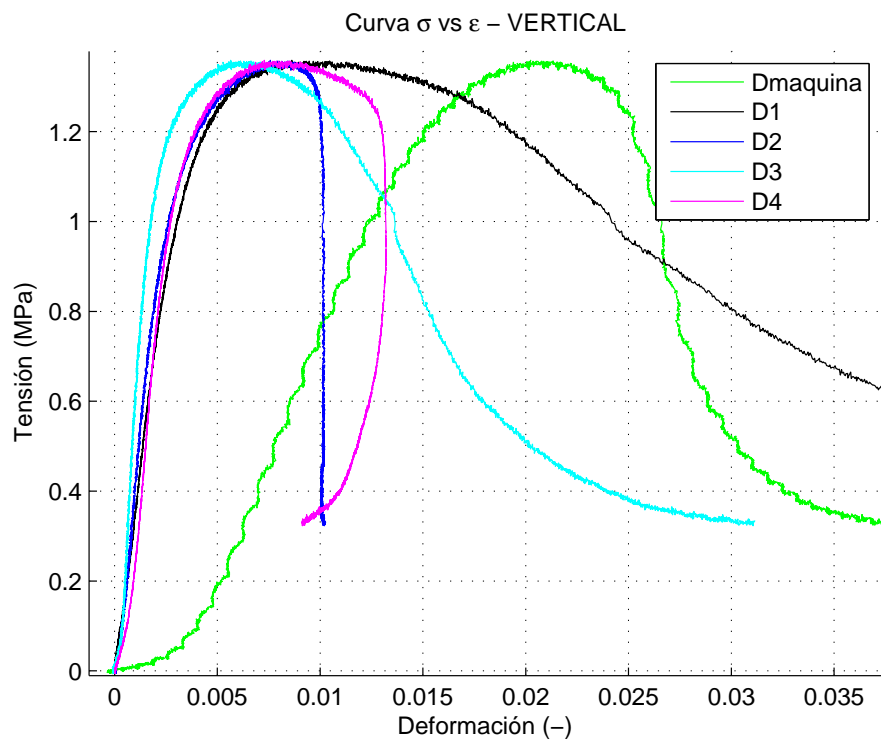


Figura 4.42 Curvas Tensión-Deformación de la pila número 5 .

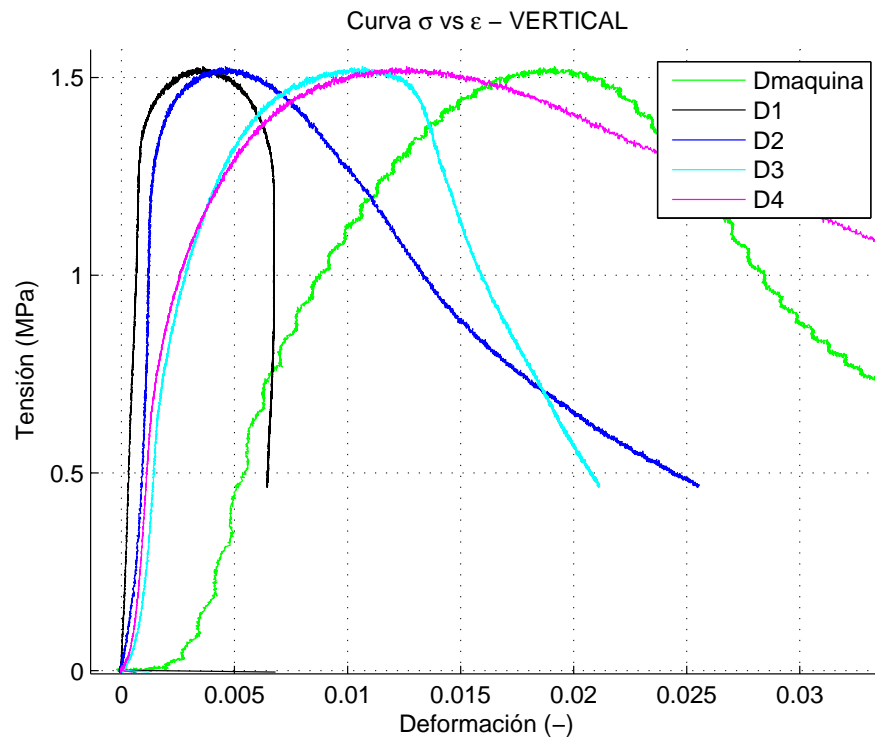


Figura 4.43 Curvas Tensión-Deformación de la pila número 6 .

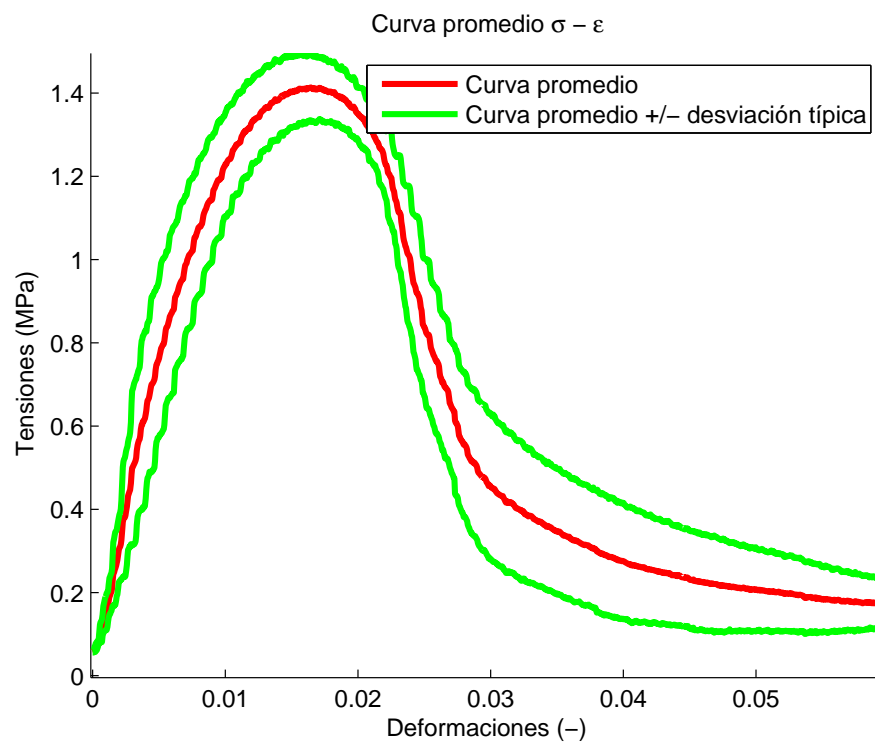


Figura 4.44 Curva promedio de las pilas de los lotes 1 y 2 +/- variación típica, sin contar con la ponderación de la pila 1 .

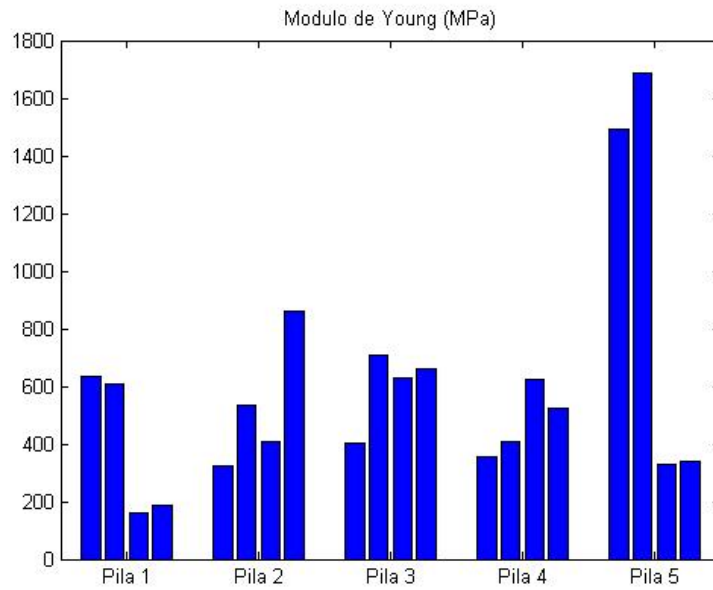


Figura 4.45 Módulo de Young de las pilas obtenido a partir de cada sensor de desplazamiento. Pila 1 se corresponde con la segunda del primer lote. Las siguientes son las pilas del lote 2.

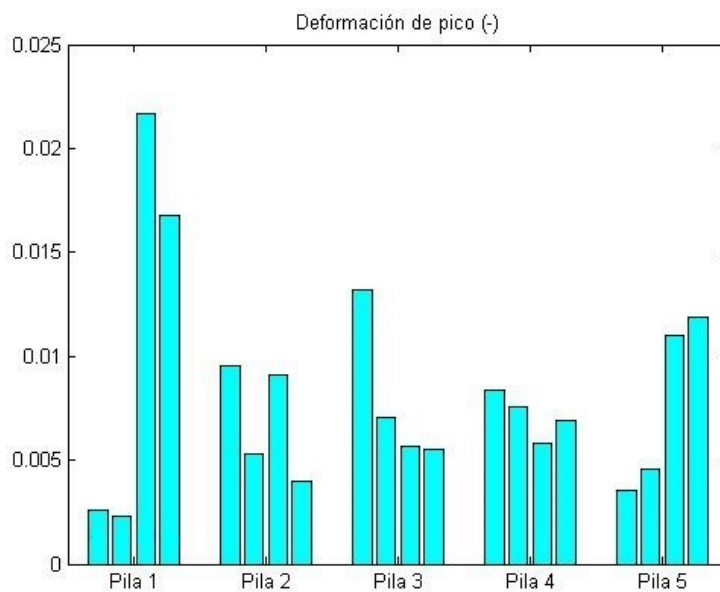


Figura 4.46 Deformación de pico de las pilas obtenida a partir de cada sensor de desplazamiento. Pila 1 se corresponde con la segunda del primer lote. Las siguientes son las pilas del lote 2.

Los ensayos de pilas, a partir del primero, se ejecutaron a una velocidad lineal de 1 mm/min. El desplazamiento del pistón del pórtico en el momento de la rotura varía dependiendo del ensayo, pero el valor se aproxima a 15 mm, lo que significa que la rotura se alcanza a los 15 minutos de haber comenzado el ensayo.

La curva promedio se ha realizado en este caso considerando la aprotación de las pilas de ambos

lotes. Se ha hecho de ésta manera porque, al descartar la curva asociada a la primera pila, la curva promedio del primer lote hubiese carecido de sentido, ya que se hubiese tomado la curva característica de la pila número 2, y la desviación asociada hubiese sido nula.

Para realizarla promedio se han tomado las deformaciones asociadas al desplazamiento del pórtico. Se ha hecho de tal manera para permitirnos comparar la ley de comportamiento ($\sigma - \epsilon$) de las pilas con las leyes que hemos obtenido del resto de tipologías de ensayo.

La tara que se ha efectuado para obtener la curva promedio de las pilas ha sido de 5 kN, pues en proporción esta fuerza cubre un rango parecido de tensiones que la tara que hemos realizado en las probetas.

5 Análisis de los resultados

En el presente capítulo se analizarán las gráficas correspondientes al capítulo anterior. Podemos observar la disparidad asociada a los ensayos en cuanto a sus curvas características se refiere. A pesar del cuidado con el que se han realizado las probetas y los ensayos, es muy difícil obtener resultados idénticos para probetas iguales. Esto se debe principalmente a la heterogeneidad que posee el material, debido a que la distribución interior de la tierra arcillosa, de la arena y de la paja presentan una aleatoriedad incontrolable. Es conveniente, por lo tanto, ejecutar un número considerable de ensayos que permitan obtener las propiedades del material, pudiendo despreciar las curvas que se alejen más de la media.

Las características que hemos obtenido (módulo de elasticidad, deformación de pico y resistencia a compresión simple), varían dependiendo del tipo de ensayo al que sean sometidas las probetas.

El problema que encontramos con el tipo de material que se está estudiando es que la normativa referente al mismo es muy escasa. De hecho, en España, no hay normativa referente al adobe, este proyecto se ha adaptado a la normativa española concerniente a las fábricas de albañilería.

Es por eso que no hay un ensayo estándar para calcular las propiedades del material y se han tenido que ir probando diversas opciones con respecto al tipo de carga. Es conveniente que, a través de estudios como el presente, aparezcan más normas de construcción con tierra para hacer este tipo de edificaciones mas seguras. Es decir, se debe estandarizar un tipo de ensayo para que se puedan comparar las propiedades del material en diferentes partes de España, o del mundo, bajo unas circunstancias similares.

La deformación asociada a las roturas de las probetas ha sido relativamente baja, lo que corrobora que el comportamiento del material es frágil. La energía que es capaz de absorber el material es consecuentemente baja.

Las fracturas asociadas a los materiales frágiles son: fracturas por extensión (splitting) y fracturas de cizalla. Normalmente, si el material tiene una resistencia a esfuerzos de cizalladura mucho más baja que a esfuerzos de compresión, se produce la clásica fractura a 45° , plano en el que el esfuerzo de cortadura es máximo.

Sin embargo, para un mismo tipo de material, como es el caso, la fractura también varía en función del tamaño de la probeta. Ambos tipos de fracturas han estado presentes en los ensayos.

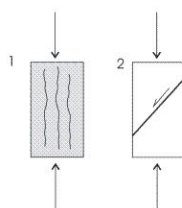


Figura 5.1 Fracturas tipo splitting (1) y de cizalla (2).

5.1 Análisis de ensayos por tipología

5.1.1 Análisis de los ensayos de cubos

Los ensayos de cubos son, probablemente los ensayos que más disparidad presenten en cuanto al trazado de las curvas. Tal efecto se antoja lógico, pues, cualquier imperfección interior de la probeta, produce una mayor alteración en las propiedades cuanto menor sea la dimensión de la misma.

Las curvas promedio de las probetas cúbicas presentan un salto en tensiones como se puede observar en las figuras 4.9 y 4.10. Este escalón es debido a la variación en la velocidad de carga, pues, como vemos en la figura 4.4, se produce en todas las curvas coincidiendo con un desplazamiento de 4 mm, justo el destino que habíamos marcado para la primera rampa.

En la misma figura 4.4, es destacable la significativa diferencia de trazados entre los ensayos de control en carga y en desplazamiento. La probeta número 2 y número 3 del lote 1, que son las que se ensayaron con control en desplazamientos, presentan un tramo de descarga totalmente rectilíneo, con uno o dos puntos que le marcan la trayectoria. Ésto es debido a que la máquina va buscando un incremento en la carga que nunca encuentra, pues el material después de la rotura no es capaz de soportar un incremento de tensiones.

Es interesante comentar la poca dispersión presente en los valores de resistencia a compresión con respecto a los valores de deformación de pico y módulo de elasticidad.

La rotura asociada a este tipo de ensayos ha sido fractura extensional, la podemos apreciar en la figura 5.2 En el proceso se inicia el crecimiento de pequeñas microfracturas a partir de los defectos existentes. Todas las microfracturas crecen por medio de la propagación longitudinal con respecto a la carga aplicada.

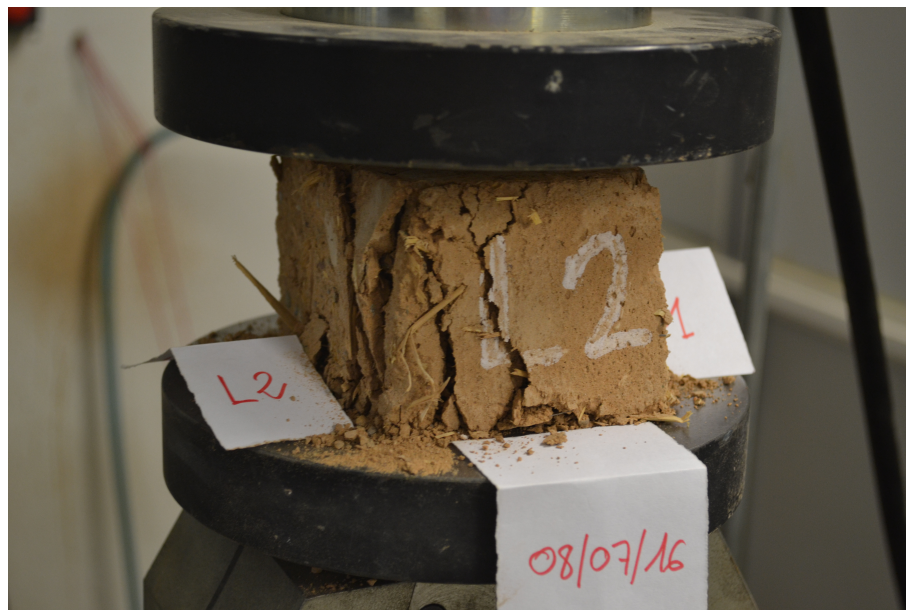


Figura 5.2 Fractura característica de los ensayos de probetas cúbicas.

5.1.2 Análisis de los ensayos de prismas

La resistencia media a compresión de los prismas es la menor de entre todas las tipologías de ensayo. Si comparamos estos ensayos con los de cubos, esta relación es lógica. Contando con un área sometida a la carga similar en ambos casos, una mayor dimensión principal de la probeta, provoca que, mediante el efecto de Poisson, aparezcan unas mayores tensiones tangenciales.

Estas tensiones tangenciales son las responsables de disminuir la resistencia de las probetas. Tal es su influencia, que el tipo de fractura que presentan las probetas cilíndricas es a 45°.

En cuanto a las curvas características, en la figura 4.15 se diferencian claramente los ensayos que no han seguido el modelo de carga final establecido. La probeta 1 y 2 del lote 1 se ensayaron con control en carga y la probeta número 6 con control en desplazamiento pero a una velocidad de carga de 10 mm/min, es decir, cinco veces mayor.

En la figura 4.17, podemos apreciar como la probeta número 1, la cual tiene una deformación de pico considerablemente superior al resto, produce un salto en la curva promedio de las unidades del lote 1. Claramente, no se considera que tal efecto sea representativo a la hora de evaluar la dispersión de los ensayos, pues se sometió a un tipo de carga diferente.

Por otro lado, vemos como las probetas prismáticas del lote dos, presentan una dispersión en su curva promedio muy baja, pues se hicieron todos los ensayos semejantes. Bien es verdad, que la probeta número 3 tenía una imperfección en su cara inferior, lo que provocó que soportase menos esfuerzos (figura 4.16.), además de disminuir considerablemente su módulo de elasticidad, como se puede ver en la figura 4.21.

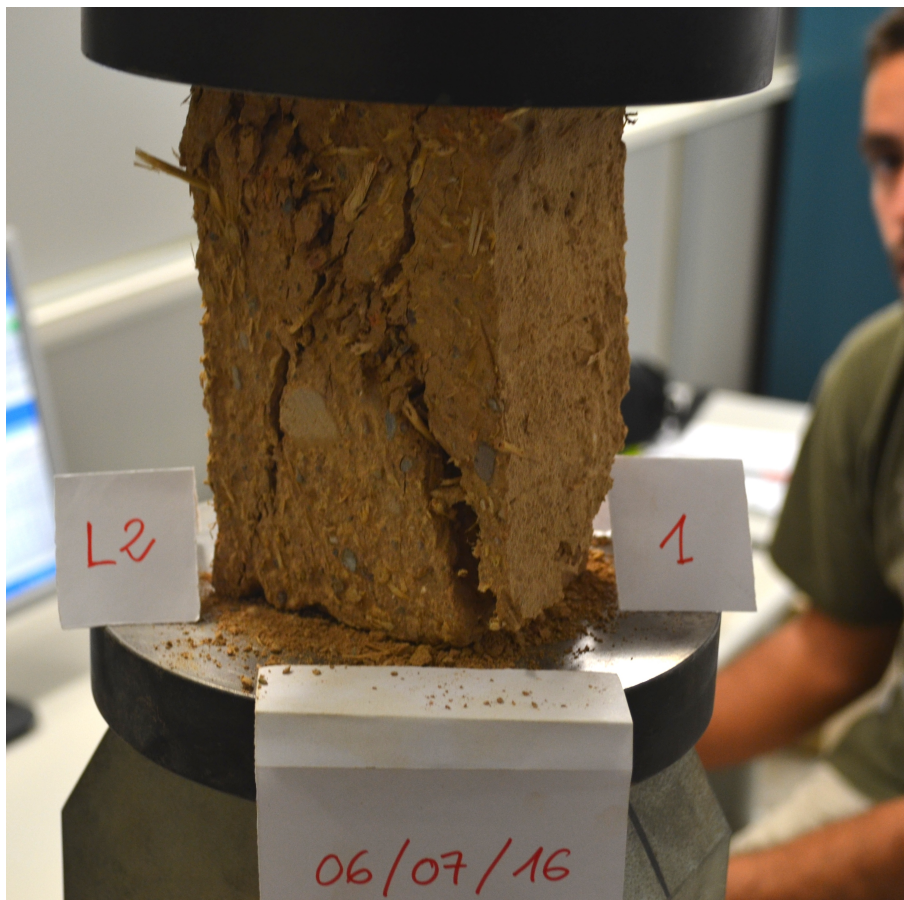


Figura 5.3 Fractura característica de los ensayos de probetas prismáticas.

5.1.3 Análisis de los ensayos de prismas instrumentados con LVDT y cilindros

Se han agrupado ambos tipos de ensayos porque las características que nos interesan remarcar de estos ensayos son similares.

Se puede apreciar en las cinco gráficas que representan las curvas $\sigma - \varepsilon$, cómo la curva facilitada por el desplazamiento del pistón de la máquina de ensayos tiene, en todos los casos, un módulo de elasticidad menor que las facilitadas por los sensores LVDT. Ocurre lo mismo con la deformación de pico.

Este fenómeno se explica por las dos razones. La primera es el acoplamiento del plato ejecutor sobre la cara superior de la probeta. La segunda es que el desplazamiento transmitido por la máquina está influido por la deformación del pórtico que transmite la carga.

Tampoco parece que guarden mucha relación los valores de deformación de pico y módulo de elasticidad de los ensayos, por lo que se antoja complicado poder promediar un valor para ellos.

La fractura asociada a las probetas prismáticas es también de cizalladura. La relación de esbeltez de este tipo de probetas es parecida a la de las prismáticas, por lo que es razonable que la fractura asociada a su rotura sea del mismo tipo.

Debido a las grietas que surgieron en posiciones que influían en la longitud medida por los sensores, y también a fallos eléctricos de los mismos, los tramos de descarga correspondientes a los ensayos de cilindros no eran representativos, por lo que se decidió eliminarlos.



Figura 5.4 Fractura característica de los ensayos de probetas cilíndricas.

5.1.4 Análisis de los ensayos de pilas

Los ensayos de pilas presentan unas curvas con comportamientos similares a los que hemos visto en los cilindros y prismas instrumentados. Existe una dispersión significativa en los valores de módulo de elasticidad y deformación de pico, pero no en la resistencia a compresión.

La conclusión que podemos sacar de este fenómeno es que, en un rango tan bajo de valores, el desplazamiento es más complicado de cuantificar con exactitud que la fuerza debido a varios factores.

Por un lado, las pletinas sobre las que apoyamos los transductores no son totalmente rígidas. Por otro lado, las fisuras que aparecen en las piezas distorsionan los desplazamientos reales que se están produciendo.

También induce a errores en la cuantificación del desplazamiento la deformación que sufre el pórtico de la máquina de ensayos, aunque tal caso no incluiría a los sensores LVDT.

Otro factor a tener en cuenta es la mano de obra. Dependiendo de lo compactada que se haya elaborado la pieza, sufrirá más o menos deformaciones antes de llegar a su límite de rotura.

La curva característica promedio de la pilas (figura 4.44) es la que presenta menores valores de dispersión. La curva característica correspondiente a la pila 1 no se ha incluido en la gráfica debido a los tramos de descarga que presenta. Tal curva se ha trazado con un promedio de las otras cinco pilas, tomando los desplazamientos del pórtico de ensayos. La baja dispersión de los datos se justifica por el comportamiento uniforme que tiene la mampostería. Las pequeñas imperfecciones asociadas a los bloques individuales dejan de tener la misma influencia sobre el conjunto.

La fractura característica asociada ha sido, en la mayoría de los casos, de cizalladura. Hubo una pila que no presentó la rotura a 45°, sino que rompió por aplastamiento.



Figura 5.5 Fractura característica de los ensayos de pilas.

5.2 Comparación de propiedades asociadas a la tipología de ensayo

En el presente apartado se pretende hacer un resumen de todas las propiedades obtenidas en los diferentes ensayos.

Las tablas resumen muestran los valores obtenidos para cada probeta de resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulo de elasticidad. Para las probetas que contaban con transductores, se han promediado los valores de los mismos.

Las tablas expresan los mismos resultados que expusimos mediante gráficos de barras en el capítulo anterior. No obstante, se ha considerado oportuno presentarlas también de este modo con el fin de permitir comparar cuantitativamente los resultados.

Se han eliminado de las tablas las probetas que diferían significativamente de la media y que no fueron ejecutadas según el ensayo estándar del proyecto.

En la figura 5.6, se representan los valores medio y desviación típica de la resistencia a compresión de cada una de las tipologías de ensayo que se han llevado a cabo.

Y por último, en la figura 5.7, queda reflejada la ley de comportamiento del material a través de las curvas promedio de cada tipología de ensayo, cuyas deformaciones se han obtenido a partir del desplazamiento transmitido por la máquina de ensayos, tanto en el caso de probetas como en de pilas.

Tabla 5.1 Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas cúbicas .

UNIDAD	$f_{ck}(MPa)$	$\varepsilon_{pico}(-)$	E(MPa)
CU-L1-1	1,214	0,0228	92,46
CU-L1-2	1,389	0,0270	105,67
CU-L1-3	1,228	0,0219	87,67
CU-L1-4	1,483	0,0283	85,62
CU-L1-5	1,201	0,0305	85,33
CU-L1-6	1,275	0,0242	90,62
CU-L1-7	1,138	0,0208	93,45
CU-L2-1	1,140	0,0271	71,86
CU-L2-2	1,108	0,0333	57,31
CU-L2-3	1,238	0,0301	63,07
CU-L2-4	1,185	0,0296	72,12
CU-L2-5	1,127	0,0195	96,19
CU-L2-6	1,244	0,0230	94,22
CU-L2-7	1,155	0,0214	75,48
CU-L2-8	1,337	0,0229	93,97
CU-L2-9	1,305	0,0292	60,65
CU-L2-10	1,241	0,0255	93,55
CU-L2-11	1,151	0,0260	83,28
CU-L2-12	1,323	0,0345	54,94
CU-L2-13	1,268	0,0372	45,76
CU-L2-14	1,383	0,0332	68,26
CU-L2-15	1,216	0,0391	56,50
CU-L2-16	1,276	0,0268	53,45
Valor medio	1,241	0,0271	75,51
desviación típica	7,66 %	19,56 %	22,67 %

Tabla 5.2 Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas prismáticas.

UNIDAD	$f_{ck}(MPa)$	$\varepsilon_{pico}(-)$	E(MPa)
PR-L1-1	1,227	0,0211	155,03
PR-L1-2	0,873	0,0173	74,30
PR-L1-3	0,951	0,0175	113,73
PR-L1-4	1,026	0,0219	91,46
PR-L1-5	1,303	0,0184	154,31
PR-L2-1	1,121	0,0141	173,03
PR-L2-2	1,144	0,0152	230,11
PR-L2-3	1,133	0,0227	119,24
PR-L2-4	1,055	0,0201	134,00
PR-L2-5	0,943	0,0238	137,05
PR-L2-6	0,954	0,0210	182,25
Valor medio	1,059	0,0191	135,98
desviación típica	12,46 %	16,23 %	32,23 %

Tabla 5.3 Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas cilíndricas.

UNIDAD	$f_{ck}(MPa)$	$\varepsilon_{pico}(-)$	E(MPa)
CI-1	1,379	0,0038	862,80
CI-2	1,295	0,0028	1393,66
CI-3	1,573	0,0024	1200,11
Valor medio	1,411	0,003	1130,046
desviación típica	10,13 %	33,33 %	23,77 %

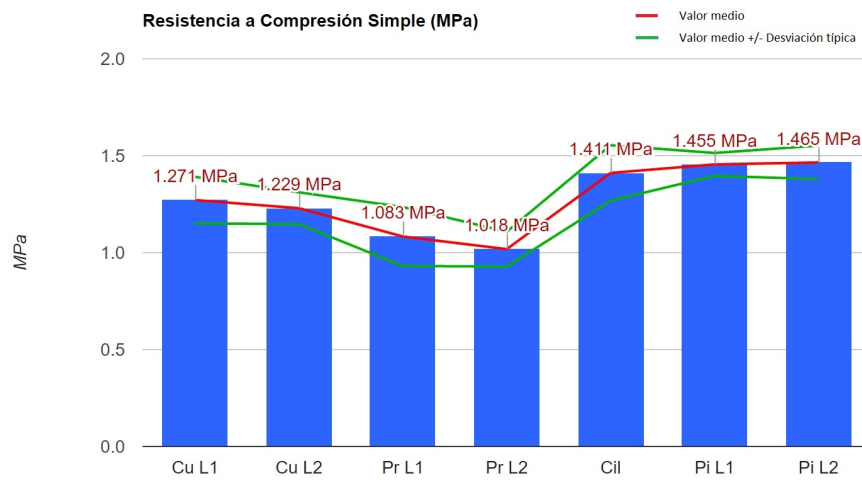
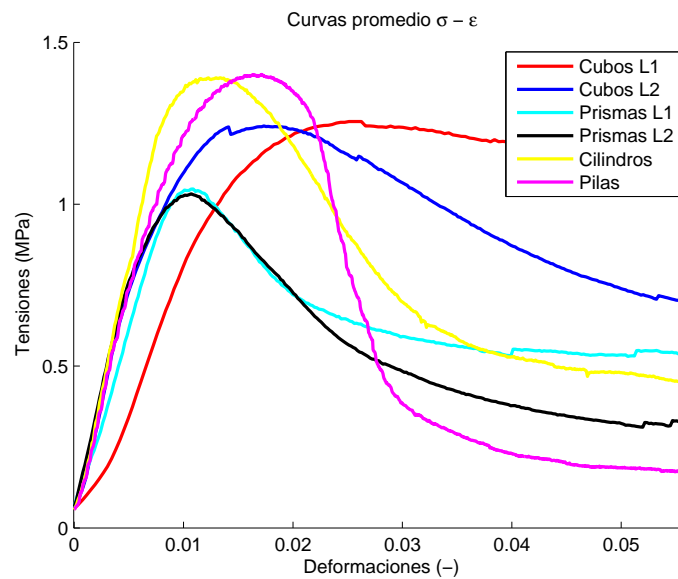
Tabla 5.4 Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas prismáticas instrumentadas.

UNIDAD	$f_{ck}(MPa)$	$\varepsilon_{pico}(-)$	E(MPa)
PR-L2-7	1,176	0,0095	148,98
PR-L2-8	1,005	0,0036	528,77
Valor medio	1,087	0,0058	280,66
desviación típica	11,13 %	70,68 %	95,7 %

Como se puede observar en las tablas resumen, la resistencia a compresión simple del material presenta unos valores muy similares para todos los tipos de ensayo. Vemos como la desviación típica no representa siquiera el 15 % del valor total en ninguna de las tipologías. Es una propiedad muy importante a la hora de calcular estructuras.

Tabla 5.5 Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las pilas.

UNIDAD	$f_{ck}(MPa)$	$\varepsilon_{pico}(-)$	E(MPa)
PI-L1-1	1,414	0,0068	328,35
PI-L2-1	1,401	0,0065	496,89
PI-L2-2	1,463	0,0073	586,03
PI-L2-3	1,415	0,0071	468,87
PI-L2-4	1,590	0,0068	728,14
Valor medio	1,454	0,0069	504,38
desviación típica	5,39 %	4,35 %	29,3 %

**Figura 5.6** Valor medio y desviación típica de la resistencia a compresión simple de todas las tipologías de ensayo.**Figura 5.7** Ley de comportamiento del material según la tipología de ensayo.

6 Conclusiones y trabajos futuros

Para finalizar este documento, se resumen las conclusiones más importantes que se han podido extraer del grueso del trabajo.

Debido a la heterogeneidad en su composición y la falta de datos experimentales que encontramos acerca del comportamiento del adobe, no eran pocas las dudas que surgían acerca de la viabilidad de obtener resultados satisfactorios a partir de los ensayos llevados a cabo. Pese a la incertidumbre que provocaba, el análisis experimental del material ha sido todo un éxito.

En lo que a la compresión simple respecta, la cual es una de las propiedades más importantes de un material a la hora de calcular estructuras, los resultados que hemos obtenido poseen una dispersión relativamente baja en cuanto a sus valores, con una desviación menor del 15 %, del orden de la que encontramos en ensayos de probetas de hormigón.

Sin embargo, el valor medio de la resistencia a compresión simple varía dependiendo del tipo de probeta que estemos ensayando o el modelo de carga que se le aplique al ensayo. Es muy importante que se estandarice un tipo de ensayo mediante una norma, para así poder comparar los resultados obtenidos entre diferentes investigaciones.

Por otro lado, aunque para determinar el valor de la resistencia a compresión simple no sea necesario, es conveniente realizar los ensayos con sensores de desplazamientos independientes de la máquina de ensayos para obtener valores representativos de las deformaciones instantáneas o el módulo de elasticidad, ya que el valor que proporciona la máquina de ensayos lleva implícito una serie de desplazamientos relativos correspondientes a la deformación del pórtico y al primer tramo del ensayo, en el que el plato de carga se aproxima a la probeta sin llegar a transmitirle carga, que distorsionan los resultados. En este sentido, hemos obtenido en ensayos ejecutados sin sensores de desplazamiento deformaciones de pico (correspondientes al máximo en tensiones) del orden de diez veces menor que las correspondientes a las transmitidas por los sensores, incluso habiendo tarado las gráficas de modo que desapareciese el primer tramo de aproximación del plato que acabamos de comentar.

Las curvas promedio de cada tipología de ensayo, por su parte, muestran una similitud considerable en cuanto a las curvas características de cada ensayo. Ésta similitud mostrada en los resultados puede dar un impulso hacia la elaboración de una normativa, con la seguridad de que el material, por muy heterogéneo que sea en su composición, no se comporta aleatoriamente ante cargas similares.

En cuanto a desarrollos futuros sobre la caracterización del comportamiento del material, continuando en la línea de este proyecto, y con el fin de caracterizar experimental y analíticamente el comportamiento mecánico del adobe, la tesis doctoral de D. José Daniel Rodríguez, bajo la tutela de D. Mario Solís Muñiz, abarcará la ejecución de ensayos sobre muretes ante cargas de compresión diagonal así como un modelo numérico que represente el comportamiento estructural de la mampostería de adobe.

En esta misma línea, y también por parte de la escuela de ingeniería de Sevilla, se está barajando la posibilidad de ejecutar, en un futuro, ensayos de muretes de adobe a escala con una geomalla de recubrimiento. La mejora del comportamiento de este tipo de estructuras con tal material ha sido certificada por varios estudios de la Pontífica Universidad Católica de Perú (PUCP).

Índice de Figuras

1.1	Construcción de tapial y adobe	2
1.2	Construcción mediante la técnica tapial	3
1.3	Construcción mediante la técnica quinchá	4
1.4	Muro de adobe con sobrecimiento de piedra	4
1.5	Shibam, la Manhattan del desierto (Yemen)	5
1.6	Mezquita de Djeneé (Mali)	5
1.7	Alhambra de Granada (España)	6
1.8	Capilla de la reconciliación (Berlín, Alemania)	8
1.9	Unidades de adobe	10
1.10	Pila de adobe	10
1.11	Prisma rectangular	11
1.12	Probeta cilíndrica	11
2.1	Método de la bolita	12
2.2	Método del rollo	13
2.3	Dosificación final	14
2.4	Cortado de la paja	15
2.5	Mezclado de los componentes	15
2.6	Rellenado de la gravera	16
2.7	Colocación de los bloques de costado	16
2.8	Prueba de resistencia de los bloques	17
2.9	Dimensiones teóricas del bloque de adobe. Unidades en cm	17
2.10	Ejecución de probetas cúbicas y cilíndricas	18
2.11	Dimensiones teóricas de pilas y muretes	19
2.12	Corte de unidades	20
2.13	Piscina de mortero	20
2.14	Comprobación de la correcta anchura de junta	21
2.15	Nivelación de la cara superior del murete	21
2.16	Pilas y muretes finalizados	21
3.1	Ejemplo de calibración por mínimos cuadrados	24
3.2	Sistema para el transporte de los muretes	25
3.3	Sistema de sujeción del murete con placa de aplicación de la carga	25
3.4	Sistema de transporte para las pilas	26
3.5	Ejecución de la capa de yeso	26
3.6	Prueba de adherencia sobre un bloque de adobe con yeso, cola y silicona	27

3.7	Elementos de fijación de un transductor HBM situado en posición vertical	27
3.8	Pila preparada para la ejecución del ensayo	28
3.9	Ejecución de ensayo de una unidad en posición horizontal	29
3.10	Curva Tensión-Deformación del ensayo de una unidad en posición horizontal	29
3.11	Ejecución de ensayo de una unidad en posición vertical	30
3.12	Curva Tensión-Deformación del ensayo de una unidad en posición vertical	30
3.13	Geometría aproximada de los bloques desde el alzado	31
3.14	Procedimiento de corte de las probetas	31
3.15	Probetas cúbicas y prismáticas preparadas para ser ensayadas	32
3.16	Posición de los transductores de desplazamiento en la primera pila	34
3.17	Dimensiones establecidas para pilas por la norma UNE-EN 1052-1	34
3.18	Disposición de los sensores de desplazamiento para un ensayo de pilas según la norma UNE-EN 1052-1	34
3.19	Posición de los cabezales de carga para ensayos de compresión oblicua	35
4.1	Máquina universal de ensayos servosis	38
4.2	Pórtico de carga marca servosis	39
4.3	Ensayo de probeta cúbica	40
4.4	Curvas Fuerza-Desplazamiento de las probetas cúbicas del lote 1	41
4.5	Curvas Tensión-deformación de las probetas cúbicas del lote 1	42
4.6	Curvas Tensión-deformación de las 7 primeras probetas cúbicas del lote 2	42
4.7	Curvas Tensión-deformación de las probetas cúbicas (8 al 13) del lote 2	43
4.8	Curvas que muestran la dispersión en los ensayos de las probetas cúbicas del lote 2	43
4.9	Curva promedio de las probetas cúbicas del lote 1 +/- variación típica	44
4.10	Curva promedio de las probetas cúbicas del lote 2 +/- variación típica, sin la ponderación de las probetas 13 y 16	44
4.11	Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas cúbicas del lote 1	45
4.12	Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas cúbicas del lote 2	45
4.13	Propiedades de las probetas estándar del lote 2	46
4.14	Imperfección en la cara inferior de una probeta prismática	48
4.15	Curvas Tensión-deformación de las probetas prismáticas del lote 1	48
4.16	Curvas Tensión-deformación de las probetas prismáticas del lote 2	49
4.17	Curva promedio de las probetas prismáticas del lote 1 +/- variación típica	49
4.18	Curva promedio de las probetas prismáticas del lote 1 +/- variación típica, sin la ponderación de la probeta 1	50
4.19	Curva promedio de las probetas prismáticas del lote 2 +/- variación típica	50
4.20	Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas del lote 1	51
4.21	Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas del lote 2	51
4.22	Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas estándar del lote 1, sin la ponderación de la probeta número 1	52
4.23	Módulo de elasticidad, resistencia a compresión simple y deformación de pico de las probetas prismáticas estándar del lote 2, sin la ponderación de la probeta número 3	52
4.24	Disposición de uno de los dos sensores de desplazamiento en una probeta prismática	53
4.25	Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT con la máquina de ensayos de la probeta prismática 9	54

4.26	Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT con la máquina de ensayos de la probeta prismática 10	54
4.27	Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta prismática 9)	55
4.28	Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta prismática 10)	55
4.29	Disposición de los sensores de desplazamiento en una probeta cilíndrica	56
4.30	Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT frente a la máquina de ensayos de la probeta cilíndrica 1	57
4.31	Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT frente a la máquina de ensayos de la probeta cilíndrica 2	57
4.32	Comparación de curva Tensión-Deformación de los LVDT frente a la máquina de ensayos de la probeta cilíndrica 3	58
4.33	Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta cilíndrica 1)	58
4.34	Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta cilíndrica 2)	59
4.35	Comparación de módulo de elasticidad y deformación de pico obtenidos por los LVDT frente a la máquina de ensayos (probeta cilíndrica 3)	59
4.36	Ejecución de un ensayo de pila	60
4.37	Curvas Tensión-Deformación transversal de la pila número 3	61
4.38	Curvas Tensión-Deformación de la pila número 1	61
4.39	Curvas Tensión-Deformación de la pila número 2	62
4.40	Curvas Tensión-Deformación de la pila número 3	62
4.41	Curvas Tensión-Deformación de la pila número 4	63
4.42	Curvas Tensión-Deformación de la pila número 5	63
4.43	Curvas Tensión-Deformación de la pila número 6	64
4.44	Curva promedio de las pilas de los lotes 1 y 2 +/- variación típica, sin contar con la ponderación de la pila 1	64
4.45	Módulo de Young de las pilas obtenido a partir de cada sensor de desplazamiento. Pila 1 se corresponde con la segunda del primer lote. Las siguientes son las pilas del lote 2	65
4.46	Deformación de pico de las pilas obtenida a partir de cada sensor de desplazamiento. Pila 1 se corresponde con la segunda del primer lote. Las siguientes son las pilas del lote 2	65
5.1	Fracturas tipo splitting (1) y de cizalla (2)	67
5.2	Fractura característica de los ensayos de probetas cúbicas	68
5.3	Fractura característica de los ensayos de probetas prismáticas	69
5.4	Fractura característica de los ensayos de probetas cilíndricas	70
5.5	Fractura característica de los ensayos de pilas	71
5.6	Valor medio y desviación típica de la resistencia a compresión simple de todas las tipologías de ensayo	74
5.7	Ley de comportamiento del material según la tipología de ensayo	74

Índice de Tablas

2.1	Evolución en peso de cuatro bloques de adobe durante un mes	18
3.1	Diferentes valores de la resistencia a compresión simple según varios autores	32
4.1	Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas cúbicas del lote 1	40
4.2	Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas cúbicas del lote 2	41
4.3	Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas prismáticas del lote 1	47
4.4	Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas prismáticas del lote 2	47
4.5	Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas prismáticas instrumentadas con LVDT del lote 2	53
4.6	Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las probetas cilíndricas instrumentadas con LVDT del lote 2	56
4.7	Dimensiones , tipo de ensayo y edad de las pilas instrumentadas con LVDT	60
5.1	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas cúbicas	72
5.2	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas prismáticas	73
5.3	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas cilíndricas	73
5.4	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las probetas prismáticas instrumentadas	73
5.5	Resistencia a compresión simple, deformación de pico y módulos de elasticidad de las pilas	74

Bibliografía

- [1] OSKMAN VF fabricación de máquinas móviles para la producción de bloques de tierra comprimida.
- [2] UNESCO. World heritage earthen architecture program, 2012.
- [3] E. Lynne and C. Adams. *Alternative construction: Contemporary natural building methods*. 2000.
- [4] J. Dethier. *Down to earth: Adobe architecture*. 1983.
- [5] Jessica Ferrer. *Construcción en tierra, vuelta a los orígenes*. 2013.
- [6] C.and Mak J. Anink, D.and Boonstra. *Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment*. London.
- [7] Symonds, Argus, Cowi, and Prc Bouwcentru. *Construction and demolition waste management practices and their economic impacts*. European Commision.
- [8] M.A. Rodriguez Diaz and B. Saroza Horta. *Identificación de la composición óptima del adobe como material de construcción de una escuela en Cuba*. Nº282 Mater. Construcción, Madrid, España, 2005.
- [9] G. Barrios, L. Álvarez, H. Arcos, E. Marchant, and D. Rosi. *Comportamiento de los suelos para la confección de adobes*. Informes de la construcción. Nº 377, Vol.37. Instituto Eduardo Torroja, 1987.
- [10] M.J. Guinea Díaz. *La tierra, material resistente al agua*. Monografía No. 385/386. Instituto Eduardo Torroja. Equipo VMBC. Madrid. España., 1987.
- [11] U. Tejada Schmidt. *Técnicas de preparación y estabilización del adobe*. V Curso Internacional sobre edificaciones de Bajo Costo en zonas sísmicas. CISMID y Universidad Nacional de Ingeniería. Perú., Octubre 1993.
- [12] Normativa internacional ASTM E519. *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*. 2002.
- [13] Normativa peruana NTE E.080. *Adobe*.
- [14] Dora Silveira, Humberto Varum, Aníbal Costa, and José Carvalho. *Mechanical Properties and Behavior of Traditional Adobe Wall Panles of the Aveiro District*. 2014.